А. Я. Глиберман и А. К. Зайцева

Кремниевые солнечные батареи



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 396

А. Я. ГЛИБЕРМАН и А. К. ЗАЙЦЕВА

КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В брошюре изложены физические принципы работы кремниевых фотопреобразователей солнечной энергии в электрическую, рассмотрены электрические и спектральные характеристики приборов и факторы, влияющие на величину к. п. д. преобразователя, охарактеризованы особенности использования солнечных батарей, описан ряд конструкций батарей и приведены примеры их применения в различных областях науки и техники.

Брошюра предназначена для подготовленных радиолюбителей и может быть полезна студентам, техникам и инженерам.

6П2.7 *Глиберман Анатолий Яковлевич* и *Зайцева Айта Константиновна*

Г 54 **Кремниевые солнечные батареи**. М.—Л., Госэнергоиздат 1961.

72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 396).

6П2,7

Редактор *П. А. Попов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 3/XI 1960 г. Подписано к печати 12/I 1961 г.
Т-01617 Бумага 84×108[1]/[32] 3,69 печ. л. Уч.-изд. л. 3,8
Тираж 35 000 экз. Цена 15 коп. Зак. 2570

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проблема использования солнечной энергии привлекает все большее внимание ученых и инженеров. Повышение интереса к этой проблеме вызвано ее перспективностью. Есть основания надеяться, что энергетика, по крайней мере в солнечных областях земного шара, в значительной мере сможет развиваться за счет прямого преобразования солнечной энергии в другие виды энергии.

Особенно привлекательны те способы использования солнечной энергии, при которых она непосредственно превращается в электрическую энергию (без предварительного преобразования в тепловую и механическую). Известны три способа такого преобразования: термоэлектрический, фотогальванический и фотоэлектрический.

При термоэлектрическом методе преобразование идет по схеме: солнечная энергия → тепло → электрическая энергия; при фотогальваническом: солнечная энергия → химическая энергия → электрическая энергия; при фотоэлектрическом: солнечная энергия → электрическая энергия.

Термоэлектрический метод представляет большой интерес, так как в связи с последними успехами в области разработки теории и практики использования полупроводников удалось создать термогенераторы, имеющие к. п. д. более 8%.

Фотогальванический метод основан на том, что в некоторых гальванических системах под действием солнечного света происходят химические реакции, сопровождающиеся образованием э. д. с. Однако этот метод находится еще в начальной стадии своего развития.

Особое внимание сейчас привлекают работы по солнечным фотоэлементам. Еще в 1953 г. считалось, что максимальный к. п. д. солнечных фотоэлементов может составлять не более 0,6%. Но уже в 1955 г. была изготовлена солнечная батарея, к. п. д. отдельных элементов которой достигал 10%. В настоящее же время имеются работы, в которых указывается, что к. п. д. кремниевых фотоэлементов теоретически, с учетом потерь, может быть увеличен до 15%. Это значит, что при солнечной интенсивности 1 000 *вт/м*^{2} можно будет получить 150 *вт* электроэнергии с 1 *м*^{2} освещенной солнцем поверхности. Изготовляемые в настоящее время фотопреобразователи имеют к. п. д. 6—10%.

Приведенные цифры говорят о том, что задача прямого преобразования солнечной энергии в электрическую становится реальной не только с точки зрения создания маломощных источников питания переносной аппаратуры, но и для сооружения энергетических установок общего назначения.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИРОДА И МОЩНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. СОЛНЦЕ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Солнце является основным источником всех видов энергии, которые человек имеет в своем распоряжении. Этот резервуар неисчерпаем. Достаточно сказать, что в течение $1{,}1 \cdot 10^9$ лет Солнце израсходует всего лишь около 2% аккумулированной в нем энергии.

Астрономия и современная физика рассматривают Солнце как гигантскую печь, в которой протекают термоядерные реакции, связанные с превращением одних элементов в другие (например, водород превращается в гелий). Эти реакции сопровождаются выделением колоссального количества энергии.

Наша Земля, находясь в среднем на расстоянии 149 млн. *км* от Солнца, не получает и половины одной миллионной доли потока энергии, излучаемой Солнцем. Кроме того, в среднем около 40% этой падающей энергии отражается на границе земной атмосферы обратно в межзвездное пространство. И тем не менее общее количество лучистой энергии, достигающее поверхности Земли в области суши (с учетом энергии, поглощаемой в атмосфере), составляет за год $9{,}5 \cdot 10^{17}$ *квт · ч*. Это огромное количество энергии, непрерывно приходящее на поверхность Земли от Солнца в течение года, в 32 000 раз больше той энергии, которая поступает за это время в мировую энергетическую систему от разных источников энергии, таких, как минеральное топливо, гидроэнергия и пр.

2. ИНТЕНСИВНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Мощность солнечного излучения для наружной части атмосферы составляет примерно 1,33 *квт/м²*, если освещаемая поверхность перпендикулярна падающим лучам. Часть этой энергии, как уже отмечалось, поглощается в атмосфере и рассеивается обратно в мировое пространство, так что в ясный летний солнечный день в средних широтах (60—40°) энергия, падающая на поверхность, перпендикулярную лучам Солнца и находящуюся на уровне моря, равна 0,8—0,9 *квт/м²*. В близких к экватору районах в условиях оптимума прохождения лучей через атмосферу поток энергии может достигать (а временами даже превышать) 1 *квт/м²*.

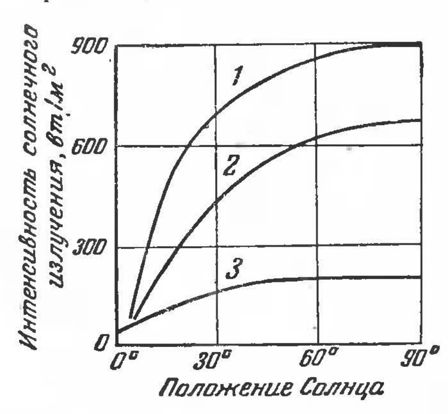


Рис. 1. Интенсивность солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность при безоблачном небе для 40° сев. широты в августе. 1—суммарная радиация; 2—прямая радиация; 3—рассеянная (диффузная) радиация.

Потери в атмосфере зависят от ее состояния (влажность, запыленность и т. п.) и от длины пути, который проходит в ней излучение, т. е. от времени года и времени суток. При наличии самых оптимальных условий среднесуточная мощность падающей на горизонтальную поверхность радиации не превосходит 0,4 *квт/м²*. В облачные дни она снижается, достигая едва одной десятой указанной величины.

Средняя годовая мощность солнечной радиации колеблется от 0,1 до 0,2 *квт/м²* на горизонтальной поверхности, что составляет 2,4—4,8 *квт · ч/м²* в день.

Суммарная (общая) солнечная энергия, падающая на земную поверхность, состоит из двух частей: прямого излучения, т. е. излучения, идущего от Солнца по прямолинейному пути, и излучения светлого небосвода—

так называемой диффузной или рассеянной радиации. В полдень ясного дня доля этого излучения составляет 20% суммарного излучения. К вечеру эта величина поднимается и после захода Солнца достигает 100% (рис. 1).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА И РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

3. О ПРИРОДЕ СВЕТА

Современная физика рассматривает свет как электромагнитное излучение определенных длин волн, обладающее двойной природой. В своих проявлениях оно обнаруживает как волновые, так и корпускулярные свойства. Свет излучается и распространяется не непрерывным потоком, а отдельными, не связанными друг с другом порциями или волновыми пакетами (фотонами). Каждый фотон является носителем определенного количества энергии. Фотоны различаются величиной своей энергии. Наибольшей величиной энергии обладает такой фотон, который соответствует излучению, характеризующемуся в волновой теории наибольшей частотой. Если говорить только о видимом свете, наибольшей энергией обладают фотоны фиолетового света, а наименьшей — фотоны, входящие в состав потока красных лучей.

Установлено, что энергия фотона ε пропорциональна частоте излучения ν:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где h — постоянная Планка ($6{,}624 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*),

Корпускулярная структура электромагнитного излучения тем легче обнаруживается, чем больше энергия фотона ε, т. е. чем больше частота ν. В потоке рентгеновских или γ-лучей практически проявляются в основном корпускулярные свойства.

Чем меньше энергия фотонов ε, т. е. чем меньше частота ν, тем в большей степени проявляются волновые свойства излучения. Поток длинноволнового излучения (радиоволн) легко обнаруживает лишь свои волновые свойства и практически не обнаруживает корпускулярных.

Видимый свет занимает очень узкий интервал частот или длин волн на шкале электромагнитного излучения: 0,4—0,8 *мк*. Описывая физические явления, происходящие при падении на поверхность полупроводника видимого излучения, последнее можно рассматривать как поток фотонов различных энергий.

4. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В МЕТАЛЛАХ И ЧИСТЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Если поток фотонов попадает на поверхность какого-нибудь металла, то часть фотонов отражается от поверхности, а оставшаяся часть поглощается металлом. Поглощенные фотоны будут отдавать свою энергию кристаллической решетке металла и свободным электронам, увеличивая амплитуду колебаний решетки и скорость

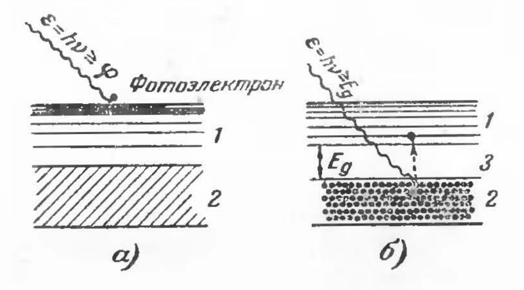


Рис. 2. Схема фотоэффекта в металлах и полупроводниках.

а—фотоэффект в металлах: квант света с энергией $\varepsilon \geqslant \varphi$ способен выбить электрон (фотоэлектрон) из зоны проводимости; *б*—фотоэффект в полупроводниках: квант света с энергией $\varepsilon \geqslant E_g$ в состоянии перебросить электрон из запрещенной зоны в зону проводимости, т. е. создать электронно-дырочную пару.

1—зона проводимости; *2*—заполненная (валентная) зона; *3*—запрещенная зона; черные кружки—электроны, белый кружок—дырка.

хаотического движения свободных электронов. Если энергия фотона велика, то она может оказаться достаточной, чтобы выбить электрон из металла, т. е. сообщить ему энергию, равную или бóльшую, чем работа выхода φ (рис. 2,*а*). Это явление называется внешним фотоэффектом. Если же поглощенный фотон обладает

энергией, недостаточной, чтобы выбить электрон из металла, его энергия пойдет в конечном счете целиком на нагрев металла.

Иную картину наблюдаем мы при воздействии потока фотонов на полупроводник.

В отличие от металлов кристаллические полупроводники в чистом виде (без примесей), если на них не воздействуют никакие внешние факторы (температура, электрическое поле, излучение света и т. п.), не имеют свободных электронов, т. е. электронов, оторванных от атомов кристаллической решетки полупроводника. Однако, поскольку полупроводниковый материал всегда находится под воздействием какой-то температуры (чаще всего комнатной), небольшая часть электронов, связанных с атомами, может за счет тепловых колебаний приобрести энергию, достаточную для отрыва их от атомов. Такие электроны становятся свободными и могут принимать участие в переносе электричества.

Атом полупроводника, лишившийся электрона, приобретает положительный заряд, равный заряду электрона. Однако место в атоме, не занятое электроном, может быть занято электроном соседнего атома. При этом первый атом становится нейтральным, а соседний — положительно заряженным.

Освободившееся в связи с образованием свободного электрона место в атоме равноценно положительно заряженной частице, названной дыркой. Дырки тоже могут участвовать в процессе прохождения электрического тока.

Энергия, которой обладают электроны в связанном с атомами состоянии, обусловливает нахождение их в пределах так называемой заполненной энергетической зоны или зоны валентных связей (зона *2* на рис. 2,*б*). Энергия свободного электрона относительно велика, поэтому он находится в более высокой энергетической зоне — зоне проводимости (зона *1* на рис. 2,*б*). Между заполненной зоной и зоной проводимости имеется зона запрещенных энергий (зона *3* на рис. 2,*б*), т. е. зона таких значений энергий, которые электроны данного полупроводникового материала не могут иметь ни в связанном, ни в свободном состоянии. Ширина этой запрещенной зоны у разных полупроводников различна. Например,

для германия она равна 0,7 *эв* (электроновольт)[1], а для кремния — 1,12 *эв*.

Дырки находятся в заполненной зоне, так как их образование возможно только в атомах кристаллической решетки полупроводника.

Количество свободных электронно-дырочных пар может резко возрасти при освещении поверхности полупроводника. Это объясняется тем, что энергия некоторых фотонов оказывается достаточной для отрыва электронов от атомов и переброски их из заполненной зоны в зону проводимости. Это явление называется внутренним фотоэффектом.

Условием осуществления внутреннего фотоэффекта является соотношение

$$\varepsilon \geqslant E_g,$$

где E_g — ширина запрещенной зоны.

Увеличение концентрации электронов и дырок приводит к возрастанию проводимости полупроводникового материала. Возникающая под действием внешних факторов проводимость тока в чистом монокристаллическом полупроводнике называется собственной проводимостью, так как она обусловлена только возбужденным состоянием атомов самого полупроводника. С исчезновением внешних воздействий свободные электронно-дырочные пары исчезают (рекомбинируют друг с другом) и собственная проводимость стремится к нулю.

Существует также явление внешнего фотоэффекта с полупроводника. Но оно носит более сложный характер, чем в случае металла.

Для создания в полупроводнике внешнего фотоэффекта необходимо, чтобы энергия поглощенного кванта была достаточной для выброса электрона из заполненной зоны и удаления его из полупроводника.

Таким образом, внешний фотоэффект с полупроводников происходит под воздействием излучения с частотой, значительно большей, чем частота света, при кото-

---

[1] 1 *эв* — энергия, которую приобретает электрон под действием ускоряющей разности потенциалов, равной 1 *в*.

рой наблюдается внутренний фотоэффект. Доля такого высокочастотного излучения в общем падающем солнечном излучении относительно невелика, поэтому внешние фототоки с обычных полупроводников малы.

Преобразование света в электрическую энергию связано только с внутренним фотоэффектом.

5. ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Идеально чистых полупроводниковых материалов, которые обладали бы одной лишь собственной проводимостью, не существует. Обычно полупроводник обладает каким-то вполне определенным типом проводимости: или только дырочным (p-тип), или только электронным (n-тип). Тип проводимости полупроводника определяется валентностью внедренной в его кристаллическую решетку активной примеси.

Для кремния активными примесями будут являться элементы, входящие в третью (бор, алюминий, галлий, индий, таллий) или пятую (фосфор, мышьяк, сурьма, висмут) группы периодической таблицы Менделеева. Сам же кремний относится к четвертой группе периодической таблицы.

Обычно внедрение в кремний активных примесей происходит по узлам его кристаллической решетки. Решетка кремния имеет кубическую форму, где каждый атом находится в узле решетки и связан так называемыми ковалентными или парно-электронными связями с четырьмя соседними атомами.

При внедрении в кремний примеси элементов пятой группы (последние характеризуются тем, что на внешней электронной оболочке их атомов имеется пять электронов) четыре электрона атома примеси окажутся связанными с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый электрон останется несвязанным. Этот электрон в создавшихся условиях будет очень слабо связан со своим атомом и при воздействии даже очень низкой температуры легко становится свободным. Атом примеси при этом становится положительно заряженным ионом.

Таким образом, примеси из элементов пятой группы легко отдают свои электроны и являются источниками свободных электронов, создавая кремний с электронной проводимостью. Такие примеси называются донорными.

Если в кремний внедрена примесь одного из элемен-

тов третьей группы (три электрона во внешней электронной оболочке), то для создания полной связи атома примеси с соседними четырьмя атомами кремния атом примеси «притягивает» к себе электрон из соседнего атома кремния, образуя в последнем «дырку». При этом атом примеси становится отрицательно заряженным ионом. Такие примеси называются акцепторными. Акцепторные примеси создают дырочную проводимость кремния.

Величина примесной проводимости пропорциональна концентрации внедренной примеси и, таким образом, может изменяться в широких пределах.

При поглощении света полупроводником с примесной проводимостью за счет возбуждения атомов основного материала (например, кремния) будут создаваться пары электрон-дырка. Создание дополнительных свободных носителей тока увеличит проводимость полупроводникового материала.

Изменение проводимости под действием света у полупроводника с примесной проводимостью значительно меньше, чем у полупроводника с собственной проводимостью. Увеличение проводимости под действием света у примесных полупроводников уменьшается по мере возрастания в нем концентрации примеси.

6. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

По принципу своего действия все фотоэлементы делятся на два класса. К первому классу относятся фотоэлементы, основанные на внешнем фотоэффекте, — вакуумные и газонаполненные, ко второму — полупроводниковые фотоэлементы с запирающим слоем, иначе еще называемые вентильными, работа которых основана на внутреннем фотоэффекте. К последним относятся меднозакисные, селеновые, германиевые, кремниевые и др.

Для работы вакуумных и газонаполненных фотоэлементов необходимо с помощью дополнительного источника постоянного напряжения (сухая батарея, аккумулятор) создавать электрическое поле определенной величины, обеспечивающее попадание всех выбиваемых светом из фотокатода электронов на анод.

Вентильные фотоэлементы отличаются от всех остальных видов тем, что под действием светового излучения они вырабатывают собственную э. д. с., достигающую

в ряде случаев на прямом солнечном свете десятых долей вольта. Они, таким образом, позволяют осуществлять непосредственное преобразование лучистой энергии в электрическую. Фотоэлементы, используемые как источники электрической энергии, обычно называют фотоэлектрическими преобразователями или просто фотопреобразователями. Наиболее совершенными из существующих в настоящее время фотоэлектрических преобразователей являются кремниевые.

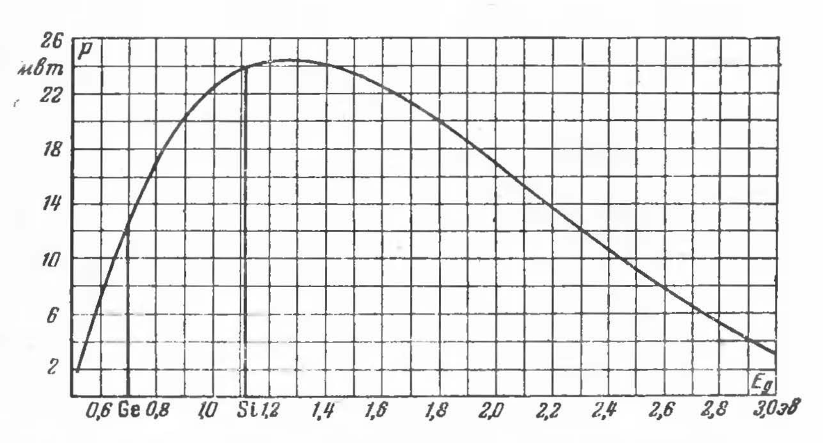


Рис. 3. Максимальная мощность *P*, получаемая от преобразователя с площадью 1 *см*² при ярком солнечном свете, как функция ширины запрещенной зоны полупроводника.

Выбор кремния в качестве исходного материала обусловлен рядом факторов. Во-первых, кремний является наиболее распространенным после кислорода элементом на земле и производство его относительно хорошо освоено. Во-вторых, как показывает теория, для солнечного спектра наибольшая выходная электрическая мощность получается у фотопреобразователей, изготовленных из тех полупроводников, ширина запрещенной зоны которых лежит в пределах 1—1,5 *эв* (рис. 3). В-третьих, кремниевые фотопреобразователи весьма подходят для использования солнечного излучения по своей спектральной чувствительности. В-четвертых, по сравнению, например, с германиевыми приборами кремниевые менее чувствительны к температурным колебаниям. Наконец, кремний позволяет достигнуть минимальных потерь на

отражение. Его очень легко образующиеся поверхностные окисные пленки обладают абсолютной прозрачностью и имеют промежуточный коэффициент преломления между коэффициентами преломления кремния и окружающей среды, что уменьшает отражение света непосредственно от поверхности самого кремния.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИНЦИП РАБОТЫ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

7. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Почти все полупроводниковые приборы, в том числе и кремниевые фотопреобразователи, представляют собой систему из двух полупроводников с проводимостями *p*- и *n*-типа, находящихся в тесном контакте друг с другом. Переходная зона (граница) между областями с противоположными типами проводимости располагается внутри полупроводникового материала и называется электронно-дырочным или *p-n*-переходом.

Благодаря тому, что по одну сторону от *p-n*-перехода в избытке находятся свободные электроны (*n*-область), а по другую — дырки (*p*-область), каждый тип этих свободных носителей тока будет иметь тенденцию диффундировать в ту часть полупроводникового материала, где имеется их недостаток (тепловая самодиффузия). Таким образом, дырки будут стремиться диффундировать из *p*-области в *n*-область полупроводника, а электроны из *n*-области — в *p*-область.

Однако эта диффузия основных носителей тока[1] не будет продолжаться до бесконечности. В самом деле, диффузия электронов в *p*-область полупроводника заряжает ее отрицательно, причем *n*-область вследствие ухода из нее некоторой части электронов заряжается положительно. Самодиффузия дырок действует в том же направлении, т. е. *p*-область заряжается отрицательно, а *n*-область — положительно. Диффундирующие дырки и электроны в виде двух слоев объемных зарядов скап-

---

[1] Основными носителями тока являются свободные носители зарядов, знак которых соответствует типу проводимости данного материала, т. е. электроны для области с проводимостью *n*-типа и дырки для области с проводимостью *p*-типа.

ливаются у *p-n*-перехода, создавая разность потенциалов между этими слоями. При этом в темноте вблизи от *p-n*-перехода со стороны *p*-области сосредоточится отрицательный, а со стороны *n*-области — положительный объемные заряды, как это показано сверху на рис. 4,*а*. Электрическое поле, образованное этими объемными зарядами, будет препятствовать дальнейшей самодиффузии основных носителей тока через *p-n*-переход.

Образованием потенциального барьера на *p-n*-переходе и обуславливаются те явления, которые дают возможность создавать различные полупроводниковые приборы (фотопреобразователи, силовые выпрямители, диоды, фотодиоды, триоды, фототриоды и т. п.).

8. ПРОЦЕСС ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Под действием света атомы полупроводника возбуждаются и в кристалле как в *n*-, так и в *p*-областях возникают дополнительные (избыточные) пары электрон — дырка, как это показано сверху на рис. 4,*б—г*. Образовавшиеся электроны и дырки, участвуя в тепловом движении, перемещаются в различных направлениях, в том числе и по направлению к *p-n*-переходу.

Благодаря наличию потенциального барьера электронно-дырочный переход будет разделять главным образом диффундирующие к нему неосновные избыточные носители тока. В результате такого разделения в *n*-области кристалла будут накапливаться избыточные электроны, а в *p*-области — избыточные дырки. Скопление избыточных (разделенных переходом) электронов в *n*-области и дырок в *p*-области фотопреобразователя будет приводить к компенсации объемного заряда, сосредоточенного у *p-n*-перехода, т. е. к созданию электрического поля, направленного в сторону, противоположную тому полю, которое уже имелось там раньше. Образованное светом электрическое поле зарядит левый (освещаемый) слой *p*-типа положительно, а правый слой *n*-типа — отрицательно. Между *n*- и *p*-областями пластинки возникнет фото-э. д. с. Концентрация образованных светом избыточных носителей тока у *p-n*-перехода, а следовательно, и величина фото-э. д. с. зависят от интенсивности светового потока и величины нагрузочного

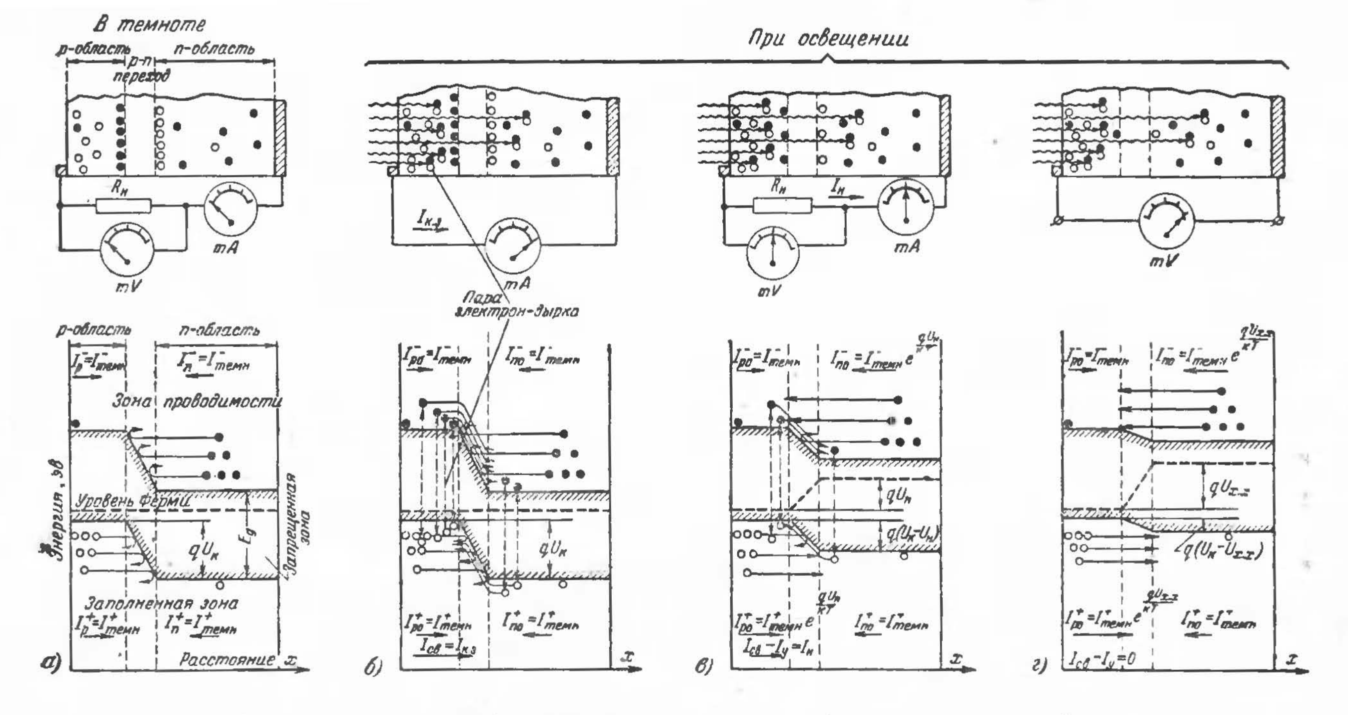


Рис. 4. Схемы, поясняющие работу фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии.

а — в темноте токи основных и неосновных носителей через *p-n*-переход компенсируют друг друга, суммарный ток равен нулю; *б* — в режиме короткого замыкания все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, проходят через него и, поскольку внешняя цепь замкнута, возможна циркуляция тока; *в* — в режиме, когда внешняя цепь замкнута на сопротивление нагрузки $R_н$, все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, частично израсходованы для снижения потенциального барьера на переходе; вторая их часть участвует в образовании тока через переход и внешнюю нагрузку; *г* — в режиме холостого хода все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, затрачены на снижение потенциального барьера перехода.

сопротивления $R_н$, включенного во внешнюю цепь фотопреобразователя.

Если цепь фотопреобразователя разомкнута ($R_н = \infty$), как это показано сверху на рис. 4,*г*, то все избыточные, разделенные переходом носители тока скапливаются у *p-n*-перехода и на максимально возможную величину компенсируют потенциальный барьер на переходе создавая максимальное значение фото-э. д. с., равное напряжению холостого хода $U_{х.х}$.

Чтобы не усложнять схему, сверху на рис. 4 условно изображены только те носители зарядов, которые создают потенциальный барьер, т. е. скопление равновесных носителей тока [1].

Если фотопреобразователь замкнут накоротко ($R_н = 0$), как показано сверху на рис. 4,*б*, то избыточные, разделенные переходом носители тока будут иметь возможность циркулировать через эту короткозамкнутую цепь, создавая максимально возможное значение тока — ток короткого замыкания $I_{к.з}$. При этом у *p-n*-перехода никакого скопления избыточных зарядов не возникнет. Потенциальный барьер будет иметь ту же высоту, что и в темноте, и фото-э. д. с. преобразоваталя будет равна нулю.

Если фотопреобразователь замкнут на какое-то конечное сопротивление $R_н$, как показано сверху на рис. 4,*в*, то часть разделенных переходом избыточных носителей заряда затратит свою энергию на снижение потенциального барьера у *p-n*-перехода, т. е. на создание напряжения $U_н$, а оставшаяся часть избыточных носителей создаст ток $I_н$ через нагрузку.

Явления, происходящие на *p-n*-переходе в темноте и при освещении, удобно представлять посредством энер-

---

[1] Концентрация электронов и дырок, которая имеется в полупроводнике в состоянии теплового равновесия, называется равновесной. Избыточные или неравновесные свободные носители тока — это дырки и электроны, возникшие под действием временных внешних факторов (свет, электрическое поле, нагрев и т. п.) сверх их равновесной концентрации. Избыточные свободные носители тока исчезают (рекомбинируют), как только прекращается действие внешних факторов. Ток во внешней цепи может протекать за счет избыточных носителей тока.

гетических схем, показанных внизу на рис. 4. Здесь по оси абсцисс отложено расстояние x в глубь фотопреобразователя (начало координат соответствует его поверхности), а по оси ординат (в некотором масштабе)—энергия, которой обладают носители зарядов (дырки и электроны). При этом следует отметить, что росту энергии электронов соответствует направление снизу вверх, а для дырок, наоборот, — сверху вниз, т. е. чем ниже изображена на схеме дырка и чем выше изображен электрон, тем большей энергией они обладают.

На такой энергетической схеме (внизу на рис. 4,*а*) полупроводниковый материал изображается в виде трех зон: заполненной зоны, или зоны валентных связей, запрещенной зоны шириной E_g и зоны проводимости. Электроны могут перемещаться в полупроводнике (и тем самым создавать электронный ток) только тогда, когда они находятся в зоне проводимости. Находиться в зоне проводимости электроны могут только в возбужденном состоянии, оторвавшись от атома донорной примеси или от атома собственно полупроводника. Дырки могут перемещаться только в заполненной зоне. Создание свободных дырок обусловлено переходом электронов от атомов собственно полупроводника к атомам акцепторной примеси или в зону проводимости.

Чтобы не усложнять картины, на приведенных энергетических схемах изображены только свободные дырки и электроны. Уровни расположения доноров и акцепторов не показаны.

В месте соединения *p*- и *n*-областей полупроводника благодаря возникновению потенциального барьера границы зон претерпевают скачок.

Рассмотрим вопросы, о которых говорилось в данной главе, несколько подробнее, с использованием энергетических схем.

В реальном полупроводниковом материале, проводимость которого определяется концентрацией донорной или акцепторной примеси, внедренной в его кристаллическую решетку, наряду с основными носителями тока всегда присутствует небольшое количество неосновных носителей тока [1]. Концентрация последних определяется

[1] Неосновные носители тока — свободные носители заряда, знак которых противоположен типу проводимости полупроводника (электроны — для области *p*-типа и дырки — для области *n*-типа).

свойствами полупроводникового материала и температурой окружающей среды. Чем больше в полупроводнике концентрация основных носителей тока, тем меньше концентрация неосновных носителей тока, и наоборот.

В примесном полупроводнике любого типа проводимости между концентрациями свободных электронов $n_{эл}$ и дырок $n_д$, т. е. между основными и неосновными носителями, существует связь, выражаемая формулой

$$n_{эл}\, n_д = n_0^2, \qquad (1)$$

где n_0 — концентрация электронов или дырок в собственном полупроводнике, т. е. в полупроводнике, лишенном всяких примесей.

Если для движения основных носителей через *p-n*-переход потенциальный барьер на последнем является препятствием (рис. 4,*а*, внизу), то для движения неосновных носителей в обратном направлении он никакого препятствия не представляет (на рисунке движение неосновных носителей заряда через *p-n*-переход не показано).

Поскольку число неосновных носителей чрезвычайно мало по сравнению с числом основных, этот обратный поток неосновных носителей через переход имеет очень малую величину.

Однако для сохранения условия электрической нейтральности поток неосновных носителей через переход в обратном направлении должен быть скомпенсирован точно таким же потоком основных носителей того же знака заряда в прямом направлении. Поэтому в темноте высота потенциального барьера $U_к$ на *p-n*-переходе автоматически устанавливается такой, при которой поток неосновных носителей через переход уравновешивается потоком основных носителей, имеющих достаточно большую энергию, чтобы преодолеть барьер.

На рис. 4,*а* внизу схематически изображена картина такого равновесного состояния в темноте. В равновесии уровень Ферми [1] в *p*- и *n*-областях полупроводника находится на одной высоте. Для хорошего качества фотопре-

[1] Уровень Ферми определяет собой максимальную энергию свободного электрона при температуре, равной абсолютному нулю. У полупроводников уровень Ферми расположен в запрещенной зоне. Его положение зависит от температуры, концентрации носителей тока и их знака. От положения уровня Ферми зависят электрические свойства материала.

образователя необходимо, чтобы величина $U_к$ была по возможности выше.

Для данного полупроводникового материала, характеризуемого определенной шириной запрещенной зоны, при прочих равных условиях высота потенциального барьера будет тем выше, чем меньше величина обратного тока неосновных носителей, или, как его еще называют, обратного тока насыщения. Это и понятно, так как для уравновешивания меньшей величины обратного тока насыщения потребуется и меньшее значение потока основных носителей через переход, а это обстоятельство обеспечивает более высокий потенциальный барьер на *p-n*-переходе.

Из сказанного легко видеть, что для обеспечения высокого значения $U_к$ необходимо применять для изготовления фотопреобразователей такой полупроводниковый материал, который имел бы малое число неосновных носителей тока в темноте.

Последнее условие выполняется, во-первых, если материал имеет большое число основных носителей тока как в *p*-, так и в *n*-областях, т. е. если материал в сильной степени насыщен донорами или акцепторами, и, во-вторых, если полупроводник имеет более широкую запрещенную зону.

Именно поэтому кремний имеет преимущество перед германием. У германия благодаря малой ширине запрещенной зоны число неосновных носителей тока в темноте значительно больше, чем у кремния. Из тех же соображений материал, обладающий более широкой запрещенной зоной, чем у кремния, например кадмий-теллур (E_g =1,5 *эв*) обеспечит еще более высокий потенциальный барьер на *p-n*-переходе. Однако при применении материалов с относительно широкой запрещенной зоной, например с E_g =2—2,5 *эв*, качество фотопреобразователей ухудшается (см. рис. 3), несмотря на рост $U_к$. Ухудшение качества обусловлено тем, что примерно половина из падающих на поверхность полупроводника квантов имеет энергию меньше 2—2,5 *эв* и не может создавать пары электрон — дырка.

Рассмотрим более подробно одну из теорий возникновения фото-э. д. с. на *p-n*-переходе [1].

[1] Эта теория разработана советским физиком С. М. Рывкиным.

Как уже было сказано, в темноте в равновесном состоянии потоки основных и неосновных носителей компенсируют друг друга. Поэтому приняв направление слева направо за положительное, можно написать:

$$\left.\begin{aligned} I_p^- - I_n^- = 0; \\ I_p^+ - I_n^+ = 0, \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

или

$$I_p^+ + I_p^- - I_n^- - I_n^+ = 0,$$

где I_n^- — абсолютное значение тока электронов из n-области в p-область (основные носители);

I_p^- — абсолютное значение тока электронов из p-области в n-область (неосновные носители);

I_p^+ — абсолютное значение тока дырок из p-области в n-область (основные носители);

I_n^+ — абсолютное значение тока дырок из n-области в p-область (неосновные носители).

На рис. 4,*а* (внизу) величины этих токов и их направления обозначены стрелками, причем токи электронов указаны в зоне проводимости, а токи дырок — в заполненной зоне. Длина стрелок пропорциональна величине токов.

Для равновесных значений токов в темноте введем обозначения:

$$\left.\begin{aligned} I_n^- = I_p^- = I_{\text{темн}}^-; \\ I_n^+ = I_p^+ = I_{\text{темн}}^+. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Поскольку все эти токи в темноте обусловливаются равновесными, а не избыточными носителями, то ток во внешней цепи фотопреобразователя протекать не будет.

Предположим теперь, что p-область освещена. Под действием энергии поглощенных фотонов в ней начнут возникать пары (электрон—дырка) избыточных неравновесных носителей тока. Увеличением под действием

света и без того большой концентрации дырок в p-области можно пренебречь. Поэтому действие освещения практически сведется лишь к увеличению концентрации неосновных носителей, т. е. электронов, в результате чего возрастет электронный ток, идущий из p-области в n-область. Приращение этого электронного тока, вызванное освещением, обозначим через $I_{св}$ (рис. 4,*б* и *в*). Другими словами, $I_{св}$ есть ток, генерируемый преобразователем при его освещении, равный эффективному потоку электронов и дырок, созданных светом и не успевших рекомбинировать до подхода к p-n-переходу и, следовательно, разделенных переходом[1].

Возникновение тока $I_{св}$ нарушает равновесие. Избыточный электронный ток неосновных носителей, идущий из p-области, приводит к частичной компенсации положительного объемного заряда, сосредоточенного у p-n-перехода со стороны n-области, и, таким образом, приводит к снижению потенциального барьера на p-n-переходе (см. рис. 4,*в*).

Уровни Ферми, которые в обеих областях полупроводника изображены так, чтобы энергетические расстояния от них до границ зон по-прежнему однозначно определяли тепловую энергию носителей тока, уже не совпадают в обеих зонах. Разрыв между ними по энергетической шкале равен произведению qU, где q — заряд электрона, а U — разность потенциалов, возникшая в результате освещения. На рис. 4,*в* $U = U_н$, где $U_н$ — падение напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$.

Для определения величины фото-э. д. с. или $U_{х.х}$ (напряжение холостого хода) рассмотрим случай разомкнутой цепи (см. рис. 4,*г*).

Снижение потенциального барьера при освещении приводит к возрастанию потока основных носителей (электронов из n-зоны в p-зону и дырок из p-зоны в n-зону). Число основных носителей заряда, которые могут преодолеть сниженный барьер, тем больше, чем ниже высота этого барьера.

По мере снижения высоты потенциального барьера на переходе (когда U возрастает до величины $U_{х.х}$) заря-

---

[1] Величина этого тока определяется интенсивностью освещения и его спектральным составом.

жающее действие фототока, состоящего из разделенных переходом неосновных носителей, все в большей мере компенсируется соответствующим возрастанием тепловых потоков основных носителей. В стационарном состоянии потоки зарядов через p-n-переход в обоих направлениях уравновешивают друг друга и, так как внешняя цепь разомкнута, общий ток равен нулю.

Для определения соответствующей этому состоянию фото-э. д. с. можно, учитывая направления токов, написать:

$$I_{св} + I^{+}_{po} + I^{-}_{po} - I^{+}_{no} - I^{-}_{no} = 0^{*}. \quad (4)$$

Поскольку приращение избыточных неосновных носителей, вызванное действием освещения, учтено током $I_{св}$, токи равновесных неосновных носителей при освещении остаются равными своим значениям в темноте

$$\left.\begin{aligned} I^{+}_{no} &= I^{+}_{n} = I^{+}_{темн}; \\ I^{-}_{po} &= I^{-}_{p} = I^{-}_{темн}. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

С другой стороны, как уже говорилось, токи основных носителей при освещении в результате снижения потенциального барьера на p-n-переходе увеличиваются и становятся равными:

$$\left.\begin{aligned} I^{-}_{no} &= I^{-}_{n} e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}} = I^{-}_{темн} e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}}\,^{**}; \\ I^{+}_{po} &= I^{+}_{p} e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}} = I^{+}_{темн} e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}}, \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

где e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2{,}72$);
q — заряд электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ $к$);
T — абсолютная температура; для $0°$ С $T = 273°$ К;
k — постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град* $= 0{,}86 \cdot 10^{-4}$ *эв/град*).

С учетом соотношений (5) и (6) уравнение (4) приобретает вид:

$$I_{св} - (I^{-}_{темн} - I^{+}_{темн}) \left(e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}} - 1\right) = 0,$$

* Индексом «о» обозначены токи равновесных носителей при освещении.

** Вывод этого соотношения дан в приложении.

или

$$I_{св} - I_{н.т}\left(e^{\frac{qU_{х.х}}{kT}} - 1\right) = 0, \qquad (7)$$

где $I_{н.т}$ — алгебраическая сумма дырочного и электронного токов неосновных носителей через p-n-переход в темноте. Под $I_{н.т}$ можно также понимать ток, который потечет через p-n-переход, если к фотопреобразователю подключить электрическую батарею в запорном направлении, поэтому ток $I_{н.т}$ называют еще обратным током насыщения. В зависимости от того, какая из составляющих больше, ток $I_{н.т}$ может быть дырочным или электронным.

В частности, у фотоэлектрического преобразователя, изготовленного из кремния n-типа, p-область, образованная термодиффузией акцепторной примеси[1], будет характеризоваться большей концентрацией дырок, чем концентрация электронов в n-области. Поэтому обратный электронный ток $I^{-}_{темн}$ из p-области в n-область будет значительно меньше, чем обратный дырочный ток $I^{+}_{темн}$ из n-области в p-область, и можно считать, что $I_{н.т} \approx I^{+}_{темн}$.

Прологарифмировав уравнение (7), можно определить фото-э. д. с. или напряжение холостого хода:

$$U_{х.х} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_{св}}{I_{н.т}} + 1\right). \qquad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что при постоянном освещении $U_{х.х}$ тем больше, чем меньше ток $I_{н.т}$.

На рис. 4,*г* внизу схематически изображен режим холостого хода. При какой-то определенной интенсивности светового потока потенциальный барьер на переходе снижен на максимальную величину, а между p- и n-областями существует разность потенциалов $U_{х.х}$, которую можно измерить, подключив к контактам освещенного фотопреобразователя высокоомный вольтметр. Так как внешняя цепь разомкнута, ток в ней равен нулю.

---

[1] Изготовление фотопреобразователей описано в § 14.

Поток через p-n-переход неосновных носителей тока, возникших под действием света, скомпенсирован потоком основных носителей, как это следует из формулы (7).

Если фотоэлектрический преобразователь замкнут на внешнее сопротивление $R_н$ (см. рис. 4,*в*, внизу), то в правую часть уравнения (7) следует вписать ток $I_н$, текущий через это сопротивление. При этом напряжение на фотопреобразователе снизится и станет равным $U_н$. Поэтому

$$I_{св} - I_{н.т}\left(e^{\frac{qU_н}{kT}} - 1\right) = I_н, \tag{9}$$

или

$$I_{св} - I_у = I_н, \tag{10}$$

где через $I_у$ обозначен ток утечки, состоящий из потока основных носителей через p-n-переход.

Напряжение на нагрузке теперь будет

$$U_н = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_{св} - I_н}{I_{н.т}} + 1\right). \tag{11}$$

Коэффициент $\frac{kT}{q}$ для температуры, близкой к комнатной[1], т. е. 20—30° С, равен 0,025—0,026 *в*, и, пренебрегая единицей в скобках под знаком логарифма (так как $I_{н.т}$ очень мало), можно написать следующее приближенное выражение:

$$U_н \approx 0{,}026\ln\left(\frac{I_{св} - I_н}{I_{н.т}}\right) \approx 0{,}059\lg\left(\frac{I_{св} - I_н}{I_{н.т}}\right). \tag{12}$$

Аналогично для тех же условий можно написать:

$$I_н \approx I_{св} - I_{н.т}\left(e^{39U_н} - 1\right). \tag{13}$$

Выражения (9) и (11) являются общими уравнениями нагрузочной характеристики фотопреобразователя.

---

[1] Обычно при таких температурах работает фотопреобразователь.

Наконец, на рис. 4,*б* схематически представлен режим короткого замыкания. Никакой разности потенциалов между *n*- и *p*-областями при этом не возникает. Все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые дошли до *p-n*-перехода, разделяются им, превращаясь в избыточные основные носители. Равновесие избыточных носителей достигается за счет протекания во внешней цепи тока короткого замыкания $I_{к.з}$.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

9. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СОЛНЕЧНОГО ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Зависимость между током $I_н$, протекающим через нагрузку, и напряжением на зажимах фотопреобразователя $U_н$ в установившемся режиме согласно уравнению (9) имеет вид:

$$I_н = I_{св} - I_{н.т}\left(e^{\frac{qU_н}{kT}} - 1\right).$$

На рис. 5 приведена кривая, соответствующая этому уравнению (сплошная линия), для кремниевого преобразователя со следующими параметрами: $I_{св} = 41{,}5 \cdot 10^{-3}$ *а*; $I_{н.т} = 1 \cdot 10^{-6}$ *а*; $U_{х.х} = 0{,}55$ *в*.

Рассмотрим участок вольт-амперной характеристики преобразователя, расположенный в квадранте I и соответствующий рабочей области. Этот участок соответствует случаю, когда *p-n*-переход ведет себя, как источник тока, а внешняя цепь — как нагрузочное сопротивление[1]. Разные точки характеристики соответствуют

---

[1] Обычно в литературе приводится выражение для нагрузочной части вольт-амперной характеристики, которая располагается в квадранте IV (между полуосями $+x$ и $-y$). Так как на практике нагрузочную характеристику удобно рассматривать в квадранте I (полуоси $+x$ и $+y$), то все формулы и графики в брошюре даны применительно к квадранту I.

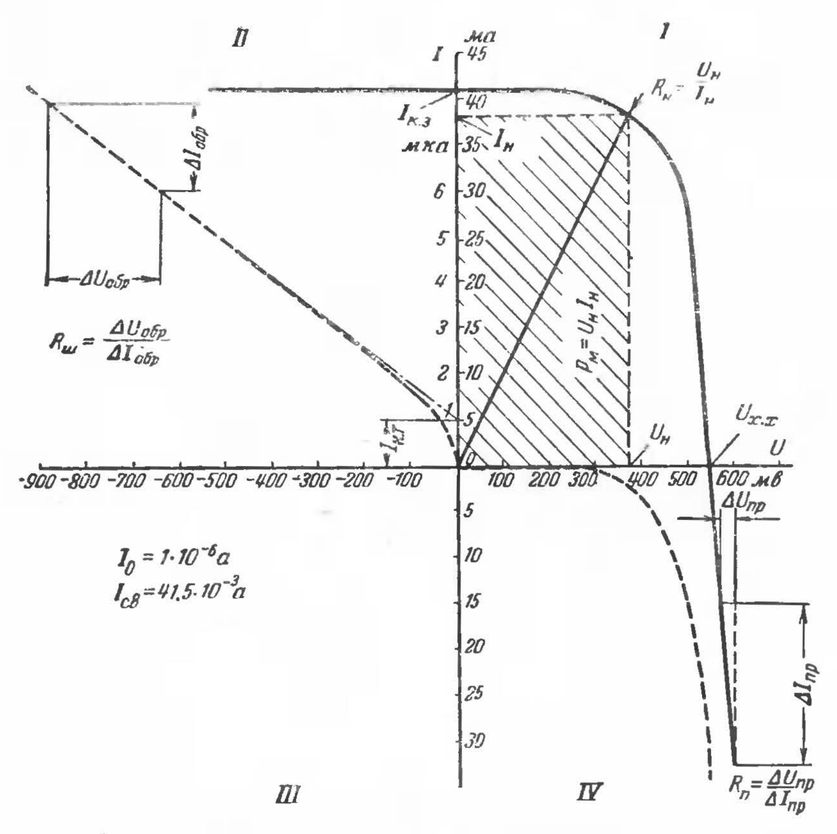


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика солнечного преобразователя. Сплошная кривая — световая характеристика; пунктирная кривая — темновая характеристика (в квадранте — II обратная ветвь, в квадранте IV — прямая ветвь).

разным сопротивлениям нагрузки $R_н$. Точка, лежащая на оси напряжения, соответствует разомкнутой внешней цепи ($R_н = \infty$; $I_н = 0$) и дает напряжение холостого хода $U^*_{х.х}$. Точка, лежащая на оси токов ($R_н = 0$), соответствует току короткого замыкания $I_{к.з}$. Если освещенный преобразователь замкнут на некоторое сопротивле-

* На практике для получения значения $U \approx U_{х.х}$ достаточно иметь $R_н = 5 — 10$ *ком*, если нагрузочная характеристика снимается для одного фотопреобразователя.

ние $R_н$, то в цепи устанавливается ток $I_н$, величина которого определяется качеством преобразователя, интенсивностью освещения и величиной сопротивления нагрузки.

Мощность P, выделяющаяся на нагрузке, определяется произведением $I_н U_н$, которому на рис. 5 соответствует площадь заштрихованного прямоугольника. Для одного и того же преобразователя при определенной освещенности величина мощности P зависит от величины сопротивления нагрузки. Наибольшая мощность выделяется на нагрузке при некотором оптимальном ее значении $R_{опт}$, которое соответствует наибольшему к. п. д. преобразования световой энергии в электрическую. Для каждого преобразователя имеется свое значение $R_{опт}$, величина которого зависит от качества, размера рабочей поверхности и степени освещенности прибора. Максимальная мощность преобразователя будет тем больше, чем выше ток короткого замыкания $I_{к.з}$ и напряжение холостого хода $U_{х.х}$, а также чем ближе форма нагрузочной кривой (в рабочей области) приближается к прямоугольной.

Из уравнения для $I_н$ можно определить $I_{к.з}$ и $U_{х.х}$.

Допустив, что $U_н = 0$ $(R_н = 0)$, получим:

$$I_н = I_{к.з} = I_{св}.$$

Допустив, что $I_н = 0$ $(R_н = \infty)$ и решив уравнение относительно $U_н$, получим:

$$U_н = U_{х.х}.$$

$$U_{х.х} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{св}}{I_{н.т}} + 1\right) \approx 0{,}059 \lg\left(\frac{I_{св}}{I_{н.т}}\right).$$

Можно составить эквивалентную схему преобразователя, которая будет соответствовать его вольт-амперной характеристике (рис. 6,*а*).

На этой схеме фотопреобразователь изображен в виде системы, обведенной пунктирной линией. Способность преобразователя создавать под действием света ток $I_{св}$ отображена введением в схему генератора постоянного тока, а способность его проводить ток только в одном

направлении — введением диода, нечувствительного к воздействию света. Через такой диод проходит обратный ток утечки $I_у$, состоящий из потока основных носителей заряда через *p-n*-переход.

Ток $I_у$ можно определить из формулы вольт-амперной характеристики *p-n*-перехода:

$$I_у = I_{н.т}\left(e^{\frac{qU_н}{kT}} - 1\right).$$

Из схемы на рис. 6,*а* видно, что

$$I_{св} = I_у + I_н,$$

т. е. только часть генерируемых светом носителей тока может проходить через полезную нагрузку; другая часть, равная $I_у$, теряется.

Упрощенная эквивалентная схема идеального фотопреобразователя, изображенная на рис. 6,*а*, не учиты-

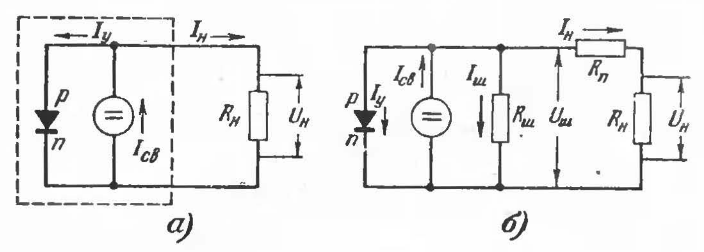


Рис. 6. Эквивалентные схемы фотопреобразователей.
а — идеальный фотопреобразователь; *б* — реальный фотопреобразователь.

вает сопротивлений, имеющихся в реальном приборе. Эти сопротивления могут быть двух видов: 1) последовательное сопротивление фотопреобразователя $R_п$, куда входит сопротивление контактов (главным образом переходное сопротивление полупроводник — металл), и сопротивление самого полупроводникового материала, из которого изготовлен фотопреобразователь; 2) параллельное или шунтирующее сопротивление фотопреобразователя $R_ш$, которое образуется за счет наличия обратного сопротивления *p-n*-перехода и различных проводящих пленок или загрязнений, шунтирующих *p*- и *n*-области преобразователя (если эти загрязнения и плен-

ки отсутствуют, то сопротивление $R_{ш}$ равно сопротивлению чистого *p-n*-перехода в запорном направлении).

Эквивалентная схема реального фотопреобразователя изображена на рис. 6, *б*.

Сопротивление $R_{п}$ включено последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{н}$, поэтому часть э. д. с., развиваемой фотопреобразователем, будет теряться на нем. Потеря напряжения на $R_{п}$ будет равна:

$$\Delta U = I_{н} R_{п}.$$

Чем больше величина $R_{п}$ преобразователя, тем больше будет падение напряжения на нем. При фиксированной величине $R_{п}$ величина ΔU зависит от сопротивления нагрузки $R_{н}$. Максимальные потери будут в режиме короткого замыкания ($R_{н} = 0$), когда

$$\Delta U = I_{к.з} R_{п}.$$

В режиме холостого хода ($R_{н} = \infty$; $I_{н} = 0$), очевидно, $\Delta U = 0$.

Сопротивление $R_{ш}$ включено параллельно цепи $R_{н}$ — $R_{п}$. Поэтому часть тока генерируемого преобразователем, будет проходить через $R_{ш}$, минуя $R_{н}$ и $R_{п}$. Таким образом, наличие $R_{ш}$ создает потери по току $I_{ш}$, которые будут тем больше, чем меньше величина $R_{ш}$.

Для вывода аналитического выражения вольт-амперной характеристики реального фотопреобразователя воспользуемся соотношением

$$I_{св} = I_{у} + I_{ш} + I_{н},$$

где $I_{св}$ — ток, генерируемый преобразователем под действием света;
$I_{н}$ — ток внешней цепи;
$I_{у}$ — обратный ток через *p-n*-переход;
$I_{ш}$ — ток через шунтирующее *p-n*-переход сопротивление $R_{ш}$.

Из эквивалентной схемы на рис. 6, *б* можно найти:

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} = \frac{U_{н} + I_{п} R_{п}}{R_{ш}}; \tag{14}$$

$$I_{у}=I_{н.т}\left(e^{\frac{qU_{ш}}{kT}}-1\right)=I_{н.т}\left[e^{\frac{q}{kT}(U_{н}+I_{н}R_{п})}-1\right]. \quad (15)$$

Подставив эти значения $I_{ш}$ и $I_{у}$ в выражение $I_{н}=I_{св}-I_{у}-I_{ш}$, имеем:

$$I_{н}=I_{св}-I_{н.т}\left[e^{\frac{q}{kT}(U_{н}+I_{н}R_{п})}-1\right]-\frac{U_{н}+I_{н}R_{п}}{R_{ш}}.$$

Логарифмируя это выражение, найдем:

$$U_{н}=\frac{kT}{q}\left[\ln\left(\frac{I_{св}-I_{н}}{I_{н.т}}-\frac{U_{н}+I_{н}R_{п}}{I_{н.т}R_{ш}}+1\right)\right]-I_{н}R_{п}.$$

Обычно величина $R_{ш}$ кремниевого преобразователя довольно велика, поэтому токовыми потерями в шунтирующем сопротивлении можно пренебречь. При этом выражения для $I_{н}$ и $U_{н}$ примут следующий вид:

$$I_{н}\approx I_{св}-I_{н.т}\left(e^{\frac{q}{kT}(U_{н}+I_{н}R_{п})}-1\right);$$

$$U_{н}\approx\frac{kT}{q}\left[\ln\left(\frac{I_{св}-I_{н}}{I_{н.т}}+1\right)\right]-I_{н}R_{п}.$$

Мощность реального кремниевого преобразователя, которую можно получить на нагрузке, будет равна:

$$P=I_{н}U_{н}\approx I_{н}\left[\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_{св}-I_{н}}{I_{н.т}}+1\right)\right]-I_{н}R_{п}.$$

Мощность P можно выразить также через $U_{х.х}$ и $I_{к.з}$ следующим образом:

$$P=\xi U_{х.х}I_{к.з},$$

где ξ — величина, которую можно назвать коэффициентом заполнения (этот коэффициент показывает, какую часть мощности, равной произведению величин $U_{х.х}$ и $I_{к.з}$, составляет мощность, снимаемая с фотопреобразователя; у хороших элементов величина ξ может достигать 0,8).

В некоторых случаях для лучшего совпадения с экспериментальными данными в показатель экспоненты в формуле для обратного тока через *p-n*-переход вводят множитель $\frac{1}{A}$, где величина A характеризует степень рекомбинации в *p-n*-переходе и лежит в пределах 1 — 3. После этого множитель q/kT приобретает вид q/AkT, а множитель kT/q — соответственно AkT/q.

В частности, для изображенной на рис. 5 кривой $A = 2$, в чем легко убедиться, решив уравнение

$$U_{х.х} = 0{,}059A\lg\frac{I_{к.з}}{I_{н.т}}$$

относительно A и подставив найденные экспериментальным путем значения $U_{х.х}$, $I_{к.з}$ и $I_{н.т}$, приведенные на характеристике на рис. 5:

$$A = \frac{U_{х.х}}{0{,}059\lg\frac{I_{к.з}}{I_{н.т}}} = \frac{0{,}55}{0{,}059\lg\frac{41{,}5\cdot10^{-3}}{1\cdot10^{-6}}} \approx 2.$$

Вольт-амперные характеристики, изображенные на рис. 5, легко получить с помощью схемы, показанной на рис. 7,*а*. Последняя ничем не отличается от схемы для снятия характеристик диодов и поэтому не требует дополнительного описания. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики (квадранты I и IV), начиная примерно от напряжения +400 *мв*, представляет собой прямую. Величина наклона этой прямой к оси токов характеризует последовательное сопротивление преобразователя $R_п = |\Delta U_{пр}/\Delta I_{пр}|$.

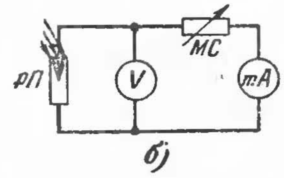


Рис. 7. Схемы для снятия вольт-амперной характеристики фотопреобразователя.

а — для снятия полной световой или темновой характеристики; *б* — для снятия нагрузочного участка характеристики. *ФП* — фотопреобразователь; *МС* — магазин сопротивлений (типа КМС-6); *ДС* — добавочное сопротивление (0 — 10 *Мом*).

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики примерно от напряжения — 100 *мв* до — (5 — 10) *в* также представляет собой прямую линию. Степень наклона

этой прямой к оси напряжений характеризует величину параллельного (шунтирующего) сопротивления преобразователя

$$R_{ш} = |\Delta U_{обр} / \Delta I_{обр}|.$$

Ввиду того что на световой вольт-амперной характеристике (рис. 5, сплошная линия) наклон обратной ветви (квадрант II) практически обнаружить невозможно, так как изменение величины обратного тока определяется микроамперами, для определения $R_{ш}$ снимают темновую обратную характеристику преобразователя (пунктирная линия в квадранте II на рис. 5). Отрезок на оси токов от начала координат до точки пересечения продолжения линейного участка обратной ветви дает в масштабе обратных токов величину $I_{н.т}$.

Нагрузочный участок вольт-амперной характеристики (квадрант I) может быть получен с помошью еще более простой схемы, приведенной на рис. 7,*б*.

10. ИНТЕГРАЛЬНАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Каждый тип фотоэлемента характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих не только его свойства, но и пределы его применения в той или иной области. К важнейшим характеристикам фотоэлемента следует отнести его интегральную чувствительность и спектральную характеристику.

Под интегральной чувствительностью фотопреобразователя i понимают величину фототока короткого замыкания $I_{к.з}$, который возникает при падении на фотопреобразователь единицы потока лучистой энергии Φ, состоящего из волн различной длины и соответствующего по своему спектральному составу излучению вольфрамовой лампы, нить которой накалена до температуры 2 840° К:

$$i = \frac{I_{к.з}}{\Phi}.$$

Очевидно, что i выражается в амперах на ватт. Однако часто величину светового потока для обычного видимого света выражают в люменах.

Указание температуры источника (2 840° К) при определении интегральной чувствительности имеет сле-

дующий смысл. Дело в том, что распределение энергии в спектре излучающего источника зависит от его температуры. В свою очередь различные фотоэлементы (по типу исходного материала или способу изготовления) не в одинаковой мере чувствительны к различным спектральным участкам. Это приводит к тому, что одинаковые по величине и мощности световые потоки, полученные от источников с различными температурами, вызовут в замкнутой цепи фотоэлемента различные по величине фототоки.

Не менее важной характеристикой любого фотоэлемента является его спектральная чувствительность, отражающая тот факт, что фотоэлемент неодинаково реагирует на излучения с различными длинами волн. Спектральная чувствительность i_λ характеризует величину фототока, возникшую под действием единицы лучистого потока определенной длины волны, и определяется как отношение фототока короткого замыкания $I_{к.з}$ к падающему на фотопреобразователь потоку монохроматического излучения[1] Φ_λ :

$$i_\lambda = \frac{I_{к.з}}{\Phi_\lambda}.$$

Знание спектральной чувствительности для какой-нибудь конкретной длины волны в большинстве случаев бывает недостаточным. Для получения полного представления о спектральных свойствах фотопреобразователя необходимо также знать распределение чувствительности по спектру, т. е. спектральную характеристику, которая отражает характер зависимости величины фототока короткого замыкания от воздействия на него лучистых потоков различных длин волн. Спектральную характеристику фотопреобразователя обычно изображают в виде графика $i_\lambda = f(\lambda)$. Максимум спектральной чувствительности кремниевого преобразователя лежит в интервале длин волн 0,7—0,8 *мк* и довольно близко подходит к максимуму распределения числа фотонов как функции длины волны в солнечном спектре.

---

[1] Монохроматическое излучение — излучение с одной длиной волны, т. е. такое, все фотоны которого обладают одинаковой энергией.

Спектральная, так же как и интегральная, чувствительность фотопреобразователя измеряется в амперах на ватт или люмен. Если спектральная характеристика известна, это значит, что известны все необходимые для работы оптические данные. Зная распределение спектральной чувствительности фотопреобразователя по спектру, можно рассчитать ту величину тока, которая возникнет во внешней цепи при падении на него лучистого потока от любого источника излучения, если известен закон распределения лучистой энергии последнего по спектру.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА К. П. Д. СОЛНЕЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

11. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Под к. п. д. η на практике подразумевается отношение максимальной мощности $P_{макс}$, которую можно снять с единицы площади преобразователя, к общей мощности солнечного излучения W, падающего перпендикулярно на единицу рабочей поверхности преобразователя, выраженное в процентах:

$$\eta = \frac{P_{макс}}{W} \cdot 100\% \approx \frac{0,8U_{х.х}I_{к.з}}{W} \cdot 100\% =$$
$$= \frac{0,8AkT}{q} \cdot \frac{I_{к.з}}{W} \ln\left(\frac{I_{к.з}}{I_{н.т}} + 1\right).$$

Для создания фотоном в полупроводнике пары электрон — дырка требуется определенная энергия. В кремнии, как отмечалось, она составляет 1,12 *эв*, что соответствует длине волны 1,2 *мк*. Фотоны с большей длиной волны (вне инфракрасной области спектра) имеют меньшую энергию и поэтому полностью бесполезны. Фотоны с более короткой длиной волны также могут генерировать пары электрон — дырка, но, как показывают расчеты, к. п. д. в этом случае уменьшается, так как избыток энергии фотона над величиной 1,12 *эв* рассеивается в виде тепла. Можно показать, что теоретический к. п. д. кремниевого элемента для солнечного спектра

должен быть приблизительно равен 22—23%. При этом пренебрегают внутренними потерями и полагают, что используются все пары электрон — дырка, образовавшиеся в материале под действием света. Реальные фотопреобразователи обладают значительно более низким к. п. д. [1], так как некоторые факторы снижают эту цифру. Эти факторы довольно многочисленны, и их можно разделить на две группы. К одной из них можно отнести факторы, обусловливаемые несовершенством приборов, а к другой — зависящие от условий эксплуатации.

12. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НЕСОВЕРШЕНСТВОМ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В фотоэлектрическом преобразователе падающая на него энергия излучения частично превращается в потенциальную энергию носителей тока. Эта потенциальная энергия и является той э. д. с. преобразователя, которая вызывает ток при подключении к преобразователю внешней нагрузки. Вследствие несовершенства устройства одновременно с полезным превращением энергии идут процессы, сопровождающиеся бесполезным рассеянием энергии в пространство в виде тепла.

В каждом фотоэлектрическом преобразователе имеют место в той или иной мере следующие виды потерь энергии (рис. 8): 1) световые потери и 2) потери энергии электронов и дырок при движении их внутри преобразователя.

Световые потери получаются из-за: 1) отражения падающего излучения от поверхности преобразователя; 2) фотоэлектрически неактивного поглощения фотонов в рабочем веществе преобразователя, т. е. поглощения фотонов без образования в полупроводнике пары электрон — дырка; 3) прохождения некоторого количества фотонов до заднего (тыльного) электрода и поглощения в нем.

Потери энергии электронов и дырок при их движении внутри преобразователя происходят за счет следующих процессов: 1) рекомбинации созданных светом пар, сопровождающейся передачей энергии решетке; 2) утечки фотоэлектронов и фотодырок через шунтирующее со-

---

[1] Коэффициент полезного действия лучших лабораторных образцов согласно литературным данным не превышает 13%.

противление $R_ш$; 3) потери энергии фотоэлектронами или фотодырками при их столкновении с атомами решетки (переход в пределах одной и той же зоны на нижележащие уровни); 4) прохождения фотоэлектронов и фотодырок через последовательное сопротивление преобразователя $R_п$.

Рекомбинация образованных светом пар и утечка через шунтирующее сопротивление составляют потери по току и определяют, какая часть созданных светом носителей доходит до *p-n*-перехода, создавая ток через сопротивление нагрузки.

Потеря энергии фотоэлектронов (или фотодырок) при столкновении с атомами решетки и прохождение их через последовательное сопротивление дают потери по напряжению. Потери по напряжению показывают, какая часть (в среднем) энергии, переданная электрону (дырке) от фотона, теряется бесполезно.

На рис. 8 показано распределение потерь для кремниевого фотоэлемента, работающего в оптимальных условиях. Остановимся на каждом из перечисленных выше видов потерь.

Световые потери. Коэффициент отражения кремния достаточно высок и примерно равен 30%. Потери на отражение можно уменьшить, применяя различного рода просветляющие слои, подобные слоям на объективах фотоаппаратов. Это позволяет уменьшить отражение в видимой части спектра до 6—9%.

Часть энергии излучения, падающего на фотопреобразователь, теряется за счет поглощения в теле полупроводника, не связанного с образованием пар носителей тока, т. е. превращается в тепло. Энергия всей длинноволновой (неактивной) части солнечного спектра, соответствующей квантам с энергией, меньшей 1,12 *эв*, в спектре солнечного излучения составляет 12—20%. С учетом потерь на отражение активной части спектра световые потери составят не менее 26—30% падающей энергии.

Количество энергии, теряемой за счет поглощения в тыльном электроде, определяется толщиной слоя рабочего вещества. Обычно до тыльного электрода доходит очень небольшая доля излучения длинноволновой области активной части спектра.

Рекомбинационные потери. Не все неосновные носители тока, созданные светом в толще полупроводника, будут участвовать в образовании тока в нагрузке. Часть из них рекомбинирует с основными носителями

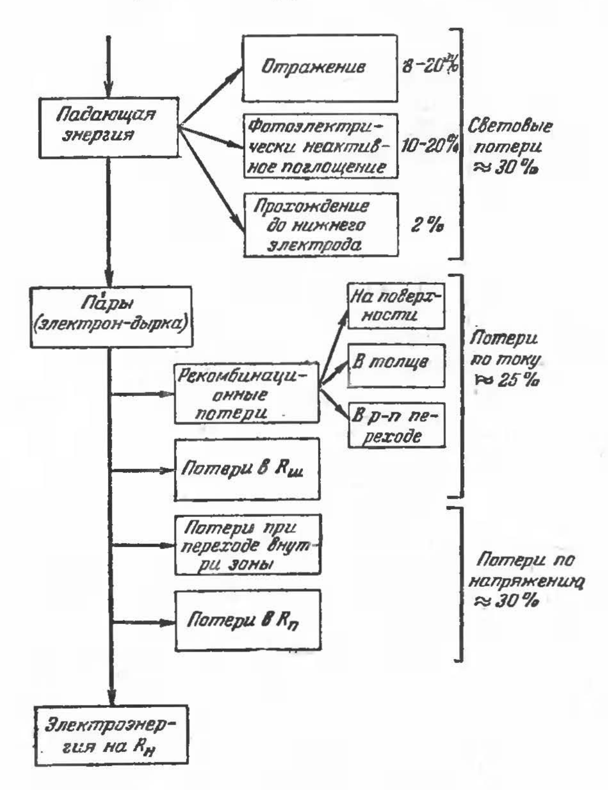


Рис. 8. Схема распределения потерь энергии в кремниевом фотопреобразователе.

в объеме или на поверхности. Это обстоятельство учитывается введением коэффициента α, характеризующего эффективность разделения пар.

Величина α представляет собой отношение экспериментально измеренного тока короткого замыкания (т. е. общего числа носителей тока, проходящих во внешнюю цепь) к полному числу носителей тока, генерируемых в единицу времени в полупроводнике.

Эффективность разделения пар зависит от ряда факторов: 1) коэффициента поглощения света в полупроводнике; 2) соотношения между глубиной залегания *p-n*-перехода и размером области, в которой происходит образование пар; 3) ширины самого *p-n*-перехода; 4) длины диффузионного смещения носителей тока[1]; 5) скорости поверхностной рекомбинации, зависящей от состояния рабочей поверхности.

Для снижения потерь на рекомбинацию необходимо, чтобы переход отстоял от области, где образуются пары, на расстоянии, меньшем, чем длина диффузионного смещения. Кроме того, следует свести до минимума скорость поверхностной рекомбинации, которая может заметно снизить к. п. д. фотоэлемента.

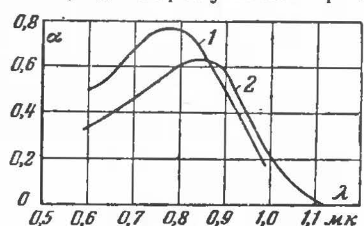


Рис. 9. Зависимость коэффициента α от длины волны для двух фотопреобразователей с разной глубиной залегания *p-n*-перехода, полученных диффузией фосфора в кремний *p*-типа.

1 — глубина перехода 9 *мк*; *2* — глубина перехода 15 *мк*.

Влияние всех перечисленных факторов на величину эффективности разделения пар α приводит к тому, что положение максимума кривой α, а следовательно, и максимума кривой спектральной чувствительности может у различных экземпляров одного и того же типа элемента довольно сильно различаться.

На рис. 9 приведена экспериментально снятая зависимость коэффициента α от длины волны λ для двух фотопреобразователей, полученных диффузией фосфора в *p*-кремний, различающихся глубиной залегания *p-n*-перехода. Максимум α у фотопреобразователя с большей глубиной залегания перехода имеет место при большей длине волны.

Последовательное сопротивление и обусловленная им конструкция фотопреобразователя. Последовательное сопротивление фотопреобразователя $R_п$ является фак-

[1] Диффузионной длиной (смещением) L называется среднее расстояние, на которое в отсутствие электрического поля удаляются носители тока от места своего возникновения до места их рекомбинации.

тором, в значительной степени определяющим его качество. В табл. 1 приведена величина относительной максимальной мощности, отдаваемой фотопреобразователем, характеристика которого дана на рис. 11, имеющим различное сопротивление $R_п$. Из этой таблицы видно, что такое незначительное по величине сопротивление, как 5 *ом*, уже снижает отдаваемую мощность по сравнению со случаем $R_п=0$ почти на 70%.

Таблица 1

$R_п$, *ом*	Относительная максимальная мощность
0	1
1	0,77
2	0,57
3,5	0,37
5	0,27
10	0,14
20	0,07

Рис. 10. Схема движения носителей в фотопреобразователях (сплошными стрелками показано направление движения носителей тока в *n*-слое, пунктирными — в *p*-слое).

а — первоначальная конструкция; *б* — современная конструкция. *1* — *n*-кремний; *2* — *p-n*-переход; *3* — *p*-кремний; *4* — верхний токоотвод (токоотвод от *n*-слоя); *5* — нижний токоотвод (токоотвод от *p*-слоя).

Величина последовательного сопротивления $R_п$, а следовательно, и потери в нем определяются удельным сопротивлением материала фотопреобразователя и его конструкцией, а также качеством и геометрией контакта и всего устройства. Для уменьшения $R_п$ необходимо использовать материал с малым сопротивлением.

На рис. 10 приведены две схемы устройства фотопреобразователей, отражающие эволюцию их конструктивного выполнения.

На рис. 10,*а* изображена конструкция первых типов фотопреобразователей. Оба электрода здесь расположены снизу. Путь носителей тока от места их разделения

до электродов относительно велик, что приводит к дополнительным потерям, так как увеличивается последовательное сопротивление прибора.

Более выгодной является изображенная на рис. 10,*б* конструкция, которая обеспечивает иной путь движения носителей тока. Верхний электрод в этой конструкции нанесен в виде металлической полоски шириной около 1 *мм*, а нижний электрод занимает площадь тыльной стороны преобразователя. Эта конструкция, кроме того, позволяет удобно осуществлять последовательное соединение фотопреобразователей.

Фотопреобразователи круглой формы (в виде диска) и небольших размеров имеют контакт на рабочей поверхности в виде узкого канта, нанесенного по краю кремниевого диска.

Найдем порядок величины последовательного сопротивления фотопреобразователя со стандартными геометрическими размерами: длина элемента $l=2$ *см*; ширина $d=1$ *см*; толщина $\delta=0{,}08$ *см*; глубина *n*-слоя $x=4\cdot 10^{-4}$ *см*.

Среднее удельное сопротивление ρ слоя *n*-типа, образованного диффузией донорной примеси, обычно составляет тысячные доли ом на сантиметр. Примем $\rho=2{,}5\times10^{-3}$ *ом·см*, а удельное сопротивление исходного *p*-кремния $\rho_{исх}=2$ *ом·см*. При этих параметрах сопротивление *n*-слоя

$$R_n=\rho\frac{d}{2lx}=2{,}5\cdot10^{-3}\frac{1}{2\cdot2\cdot4\cdot10^{-4}}=1{,}56\ \textit{ом},$$

а сопротивление исходного материала

$$R_p=\rho_{исх}\frac{\delta}{dl}=2\frac{0{,}08}{1\cdot2}=0{,}08\ \textit{ом}.$$

Из этих элементарных расчетов видно, что при рациональной конструкции элемента основная доля сопротивления $R_п$ приходится на тонкий легированный поверхностный слой, который имеет сопротивление порядка единиц ом, в то время как сопротивление исходного кремния составляет сотые доли ома.

Соответствующей технологией можно добиться, чтобы переходное сопротивление кремний—металл было невелико и составляло десятые доли ома на 1 *см*², так

что полное сопротивление в основном будет определяться сопротивлением тонкого диффундированного поверхностного слоя. Все это приводит к тому, что на величину последовательного сопротивления фотопреобразователя в значительной степени влияют конструкция и расположение верхнего электрода. Последний должен быть расположен так, чтобы обеспечить минимальный путь для носителей тока в тонком диффундированном слое. С этой целью у фотопреобразователей больших размеров на рабочую поверхность наносят дополнительные токоотводы, соединенные с основным верхним электродом. Верхний электрод стремятся расположить таким образом, чтобы, обеспечив наиболее выгодные условия протекания тока, занять под контакт как можно меньшую рабочую поверхность фотопреобразователя.

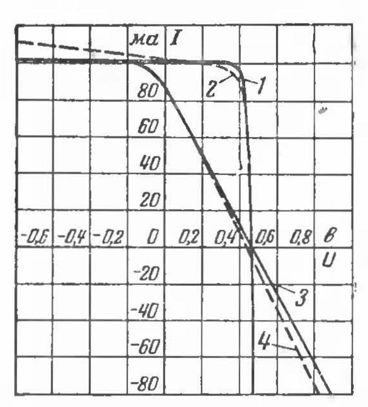


Рис. 11. Теоретические вольтамперные характеристики преобразователей с различными последовательными и параллельными сопротивлениями ($I_{св} = 0{,}1$ *а*; $I_0 = 10^{-9}$ *а*; $q/kT = 40$ *в*).

1 — при $R_п = 0$ и $R_ш = \infty$; *2* — при $R_п = 0$ и $R_ш = 100$ *ом*; *3* — при $R_п = 5$ *ом* и $R_ш = \infty$; *4* — при $R_п = 5$ *ом*; и $R_ш = 100$ *ом*.

Для современных преобразователей, сконструированных по описанному выше принципу, величина $R_п$ приходящаяся на 1 *см*^{2} освещаемой поверхности, колеблется в пределах 1—2 *ом · см*^{2}.

Шунтирующее сопротивление. $R_ш$ оказывает на работу преобразователя значительно меньшее влияние, чем $R_п$. Обычно величина $R_ш$ превышает 1 000 *ом*. Но даже при $R_ш = 100$ *ом* потери тока, обусловленные этим сопротивлением, составляют 1% генерируемого тока и потеря в снимаемой мощности незначительна. Причиной уменьшения величины $R_ш$ обычно являются различные посторонние включения, которые по тем или иным причинам остались в процессе производства на поверхности фотоэлемента у мест выхода *p-n*-перехода наружу.

На рис. 11 представлены вольт-амперные характеристики, построенные для различных значений $R_п$ и $R_ш$. Из этого рисунка видно, что шунтирующее сопротивление, даже столь малое, как 100 *ом*, слабо сказывается на виде характеристики. Небольшое же последовательное сопротивление $R_п$ (порядка нескольких ом) может резко изменить вольт-амперную характеристику в сторону ее ухудшения.

13. ФАКТОРЫ, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Существенное влияние на работу преобразователя оказывают температура и освещенность. Напряжение холостого хода линейно зависит от температуры в соответствии с формулой

$$\frac{\Delta U_{x.x}}{\Delta T} = -0{,}00288 \ \text{в/град},$$

что отвечает изменению э. д. с. примерно 0,5% на 1° С. Наклон прямых $U_{x.x} = f(T)$ остается неизменным для случаев различной интенсивности освещения.

Ток короткого замыкания слабо зависит от изменения температуры: он возрастает на $(1{,}5 \div 3)\cdot 10^{-5}$ *а* при увеличении температуры на 1° С. Поэтому зависимость выходной мощности от температуры в основном определяется зависимостью $U_{x.x}$ от температуры.

Вольт-амперные характеристики солнечного фотопреобразователя для интервала температур от —50 до +175° С показаны на рис. 12. На этом рисунке представлены также кривая максимально возможной мощности и нагрузочная прямая.

Зависимость выходной мощности одного из фотопреобразователей от выходного напряжения при освещении солнечным светом интенсивностью 1 000 *вт/м²* приведена на рис. 13. Как видно из этого рисунка, оптимальной нагрузкой, обеспечивающей максимальную отдачу и, следовательно, максимальный к. п. д., является нагрузка, соответствующая выходному напряжению 0,45 *в*. При этом элемент отдает 11 *мвт* с каждого квадратного сантиметра.

Следует заметить, что при постоянной освещенности оптимальная нагрузка зависит от температуры. Так,

например, нагрузка, являвшаяся оптимальной при температуре 25° С, уже не является таковой для более высоких и более низких температур. Поэтому при фиксированной нагрузке мощность, выделяющаяся на сопротивлении нагрузки, уменьшается как при увеличении, так и при уменьшении температуры по сравнению с точкой, соответствующей оптимальному сопротивлению.

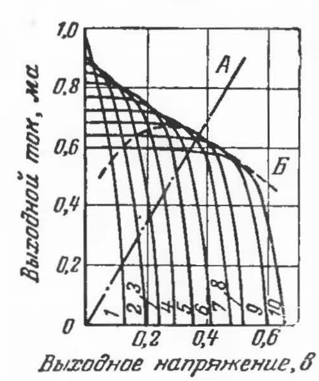


Рис. 12. Нагрузочные характеристики кремниевого фотопреобразователя при различных температурах прибора.

А — линия оптимальной нагрузки при 25° С; *Б* — кривая максимально возможной мощности. Вольт-амперные характеристики соответствуют температурам: *1* — 175° С; *2* — 150° С; *3* — 125° С; *4* — 99° С; *5* — 75° С; *6* — 50° С; *7* — 25° С; *8* — (—2° С); *9* — (—25° С); *10* — (—50°С).

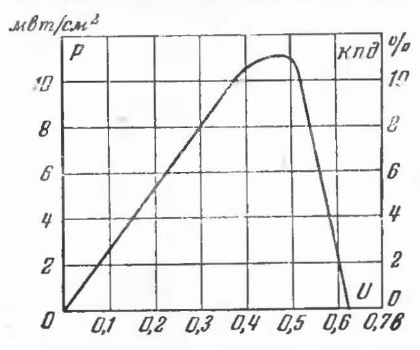


Рис. 13. Зависимость выходной мощности *P*, снимаемой с кремниевого фотопреобразователя, от напряжения на нагрузке.

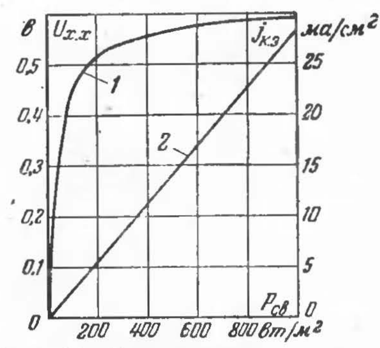


Рис. 14. Зависимость напряжения холостого хода $U_{х.х}$ и плотности тока короткого замыкания $j_{к.з}$ от интенсивности солнечного света $P_{св}$, падающего на кремниевый фотопреобразователь.

1 — график напряжения холостого хода; *2* — график плотности тока короткого замыкания.

Зависимость величин $U_{х.х}$ и $I_{к.з}$ от интенсивности солнечного светового потока, падающего на кремниевый фотоэлемент, показана на рис. 14. Эти данные получены

при окружающей температуре 17° С. Из рис. 14 видно, что ток $I_{к.з}$ пропорционален интенсивности солнечного света, а напряжение $U_{х.х}$ довольно быстро достигает значения, превышающего 0,5 *в* и далее мало меняется.

Для нагрузочных характеристик одного и того же фотопреобразователя, снятых при различной интенсивности освещения, максимальная мощность достигается всегда при одном и том же постоянном для данного образца напряжении.

В заключение приведем основные удельные параметры[1] изготавливаемых нашей промышленностью кремниевых солнечных преобразователей, соответствующие солнечному излучению мощностью 1 *квт/м²*: плотность тока короткого замыкания $j_{к.з} \approx 20 - 25$ *ма/см²*; напряжение холостого хода $U_{х.х} \approx 500 - 550$ *мв*; напряжение на оптимальной нагрузке $U_{опт} \approx 350 - 400$ *мв*; плотность тока в оптимальной нагрузке $j_{опт} \approx 15 - 20$ *ма/см²*.

ГЛАВА ШЕСТАЯ
СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

14. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Исходным материалом для изготовления фотопреобразователей является кремний, обладающий электронной или дырочной проводимостью, с удельным сопротивлением в среднем около 1 *ом · см*. Такой кремний производится в виде монокристаллических слитков цилиндрической формы.

Кремний не встречается в природе в свободном состоянии. Наиболее распространена двуокись кремния, обычно встречающаяся в виде кварцевого песка, а также породообразующих материалов (кварца, аметиста и др.) и содержащая до 26% кремния.

Первым этапом получения кремния является получение четыреххлористого кремния путем взаимодей-

---

[1] Под удельными параметрами (или удельными характеристиками) подразумеваются параметры, приведенные к площади, равной 1 *см²*.

ствия хлора со смесью песка и угля при температуре 800° С.

Этому процессу соответствует реакция

$$SiO_2+2C+2Cl_2=SiCl_4+2CO.$$

Технический продукт $SiCl_4$ используют для получения чистого кремния. Очистку четыреххлористого кремния от посторонних примесей можно производить несколькими способами. Одним из них является метод восстановления четыреххлористого кремния цинком Zn*. Пары $SiCl_4$ и Zn пропускают при температуре 950° С через кварцевый реактор. Восстановленный кремний оседает в реакторе в виде иглообразных кристаллов, чистота которых превышает 99,9%. Основной примесью является углерод.

Получение монокристаллического кремния производится по методу вытягивания из расплава в специальных установках. В тигле, находящемся в атмосфере водорода или инертного газа, с помощью токов высокой частоты расплавляется исходное вещество (Si). После выравнивания температуры в соприкосновение с зеркалом расплава приводится монокристаллическая кремниевая затравка, которая выдерживается в таком положении несколько минут. Затем ей сообщается медленное (0,2—1 *мм/мин*) движение от поверхности расплава. Если температурный режим выбран правильно, то на конце затравки, соприкасающемся с расплавом, будет наращиваться кристалл со скоростью, примерно равной скорости вытягивания. Для лучшего выравнивания температуры и получения кристаллов удобной для использования формы полезно одновременно с поступательным движением затравки сообщать ей и медленное вращательное движение.

Расплавленный кремний, температура плавления которого примерно равна 1 420° С, химически очень активен и разрушает материал тигля, образуя соединения с составляющими его элементами. Значение концентрации примесей так велико, что приходится производить спектральный анализ кварцевых изделий с целью выбора тиглей с наименьшей степенью загрязнения. Такие

---

* Могут быть использованы и другие восстановители, например водород.

же требования предъявляются и к выбору держателя затравки.

Процесс получения чистого кремния в силу столь высоких требований, предъявляемых к аппаратуре и очистке сырья, представляет большие трудности и является очень дорогостоящим.

Чтобы получить монокристаллический слиток кремния с определенным типом проводимости, в расплав добавляют некоторое количество донорной (или акцепторной) примеси, которая при вытягивании монокристалла распределяется в нем равномерно и тем самым создает материал с определенным удельным сопротивлением. Затем слитки разрезают на тонкие пластинки и тщательно очищают последние от загрязнений, которые остаются на их поверхности после резки.

Чтобы такая кремниевая пластинка могла преобразовать энергию света в энергию электрического тока, в ней необходимо на глубине нескольких микрон от поверхности создать *p-n*-переход. Для того чтобы свести к минимуму потери энергии на *p-n*-переходе, его необходимо создавать в ненарушенной кристаллической структуре, т. е. в одном и том же куске материала. Чтобы создать *p-n*-переход большой площади и на небольшой глубине от поверхности, используют метод термической диффузии донорной или акцепторной примеси в кремний.

Если, например, мы имеем пластинку из кремния *p*-типа, то для создания в ней *p-n*-перехода в поверхностный слой пластинки необходимо внедрить какую-либо донорную примесь; обычно в силу физических свойств донорных примесей (элементов пятой группы) они в условиях термодиффузии диффундируют в кремний из парообразной фазы. Число внедрившихся атомов донорной примеси должно превысить число атомов акцепторной примеси, имеющейся в исходном материале, так как только в этом случае будет создан поверхностный слой с противоположным знаком проводимости. Сам *p-n*-переход при этом образуется на такой глубине, где концентрация акцепторов исходного материала и концентрация внедрившихся доноров становятся одинаковыми. Образовавшийся таким путем слой *n*-типа достаточно тонок и почти прозрачен для падающего излучения и, кроме того, имеет достаточно низкое удельное со-

противление, чтобы обеспечить малые потери при движении носителей тока.

Аналогично можно рассуждать и в случае, когда мы имеем пластинку из кремния *n*-типа. Только здесь для создания в ней *p-n*-перехода необходимо внедрять в поверхностный слой какую-нибудь акцепторную примесь, например бор.

В случае диффузии бора кварцевый контейнер с пластинками кремния *n*-типа помещают в высокотемпературную печь, пропуская азот и треххлористый бор. В течение процесса диффузии атомы Si, реагируя с треххлористым бором, образуют парообразный четыреххлористый кремний, который уносится азотом, а атомы бора осаждаются на поверхности пластинки кремния и диффундируют из твердой фазы в ее кристаллическую решетку.

Процесс создания в кремниевых пластинках *p-n*-перехода путем внедрения соответствующих примесей является одним из наиболее сложных, важных и ответственных моментов всего технологического процесса изготовления кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Чтобы скорость внедрения примеси в кремний была достаточно большой, процесс диффузии приходится проводить в условиях очень высоких температур (около 1 300° С). Однако, несмотря на это, скорость проникновения доноров или акцепторов в кремний сравнительно низка. Поэтому для создания *p-n*-перехода на необходимой глубине от поверхности диффузионный прогрев должен быть довольно продолжительным. Весь процесс диффузии примеси должен проводиться в идеально чистых условиях, чтобы избежать проникновения в кремний нежелательных загрязнений, ухудшающих качество фотопреобразователя.

Следующий этап состоит в снятии диффундированного слоя с одной из поверхностей пластинки с тем, чтобы обнажить материал исходного типа проводимости. Теперь на одной и той же пластинке мы имеем слои с разными типами проводимости. Далее, к верхней и нижней поверхностям полупроводника нужно подвести надежные металлические контакты. В качестве контакта на пластинку кремния наносят тем или иным способом слой металла. Обычно нерабочую сторону покрывают

металлическим контактом по всей ее поверхности, а на рабочей стороне контакт осуществляют по-разному в зависимости от конструкции, размеров и формы элемента.

Последним этапом изготовления является обработка поверхности с целью уменьшения поверхностной рекомбинации и нанесение на фотопреобразователь различ-

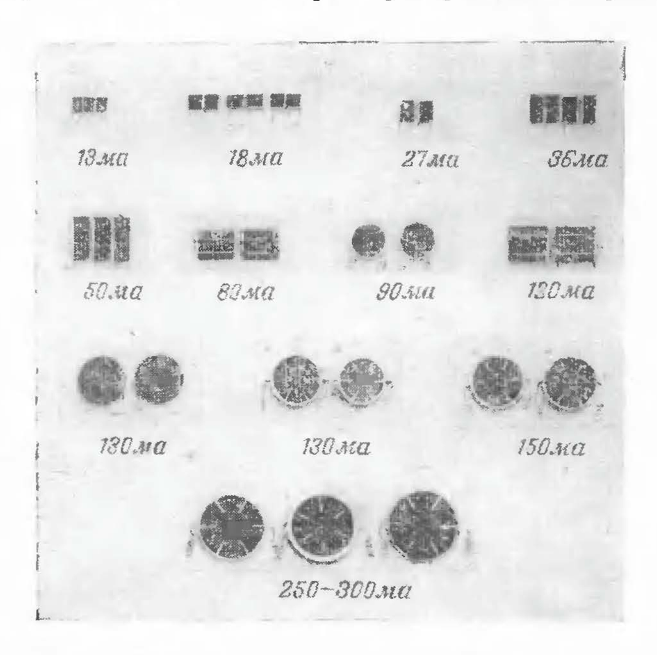


Рис. 15. Типы кремниевых фотопреобразователей, выпускаемых отечественной промышленностью (преобразователи, отмеченные точками, заключены в оправу). Токи, указанные на рисунке, соответствуют рабочим напряжениям 400 *мв*.

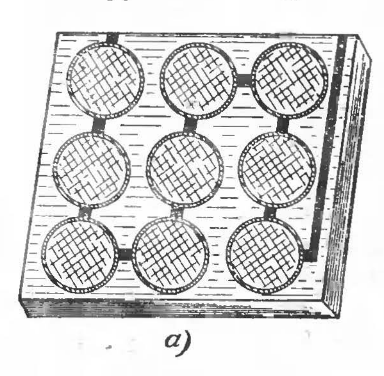
ных пленок для уменьшения коэффициента отражения. Для защиты преобразователей от механических повреждений, влаги и загрязнений их заключают в защитные корпуса, а рабочую поверхность покрывают специальным лаком.

На рис. 15 приведены некоторые типы кремниевых фотопреобразователей, выпускаемые отечественной промышленностью. Чтобы судить об их размерах, следует иметь в виду, что фотопреобразователи на ток 18 *ма* имеют площадь 1 $см^2$.

15. СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ БАТАРЕЙ

Кремниевые фотопреобразователи, так же как и химические источники тока, можно путем последовательного и параллельного включения соединять в батареи.

Величина максимально возможного тока, отдаваемого батареей, прямо пропорциональна числу параллельно включенных, а ее э. д. с. — числу последовательно соединенных фотопреобразователей. Таким образом, комбинируя типы соединений, набирают батарею с требуемыми параметрами. При этом учитывается, что э. д. с. отдельного элемента не зависит от его площади и колеблется между 0,5—0,55 *в* (при температуре элемента порядка 20° С), а ток короткого замыкания при прочих равных условиях определяется площадью прибора и составляет около 20 *ма* на 1 *см*^{2} при прямом освещении в ясную летнюю солнечную погоду.



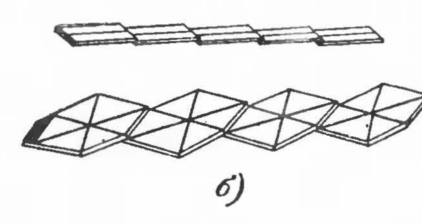


Рис. 16. Способы последовательного соединения преобразователей

а — соединение с помощью шин (проводов); *б* — соединение внахлест.

Существуют различные (в конструктивном отношении) способы последовательного соединения. Модель, изображенная на рис. 16,*а*, иллюстрирует соединение, осуществляемое с помощью внешних шин (проводов). Подобным способом соединяют обычно фотопреобразователи круглой формы. Модель на рис. 16,*б* изображает более компактный способ — соединение внахлест, при котором нижний электрод предшествующего элемента соединен с верхним электродом последующего. Подобная коммутация легко осуществляется при элементах прямоугольной и шестиугольной форм и позволяет более эффективно использовать площадь при сбор-

ке батареи. Фотография такой батареи приведена на рис. 17.

Батарея всегда имеет более низкий по сравнению с отдельными преобразователями к. п. д. Так, если к. п. д. отдельных элементов достигает 7—10%, то к. п. д. батарей площадью в несколько квадратных дециметров при тех же условиях обычно не превышает 5—8%. Это объясняется некоторыми коммутационными потерями и в основном неидентичностью элементов, что приводит при соединении их в батарею к нарушению

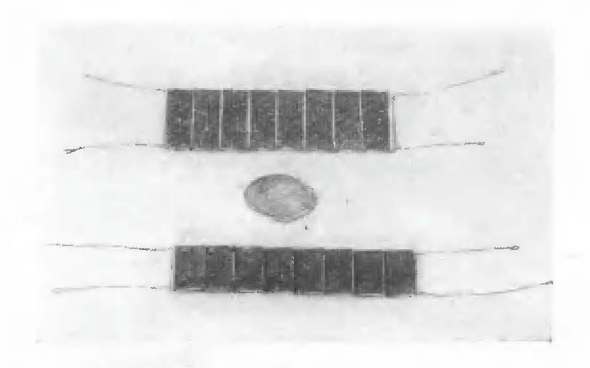


Рис. 17. Батарея из элементов, соединенных внахлест.

оптимального режима работы каждого элемента и тем самым к ухудшению удельных характеристик по току и напряжению. В связи с этим величина коэффициента в формуле для к. п. д. (см. § 11) также будет ниже и примерно равна 0,6.

На Всесоюзной промышленной выставке 1958 г. в Москве экспонировалась батарея, состоящая из 12 кремниевых фотопреобразователей прямоугольной формы. Площадь рабочей поверхности отдельных элементов составляла 1,7 *см*². Батарея в ясный летний день развивает напряжение 5 *в* при токе 20 *ма*. Другая батарея состояла из 19 фотопреобразователей шестиугольной формы с площадью отдельного элемента около 3 *см*². Эта батарея отдает ток порядка 40 *ма* при напряжении на нагрузке 7 *в*. Элементы обеих батарей собраны внахлест.

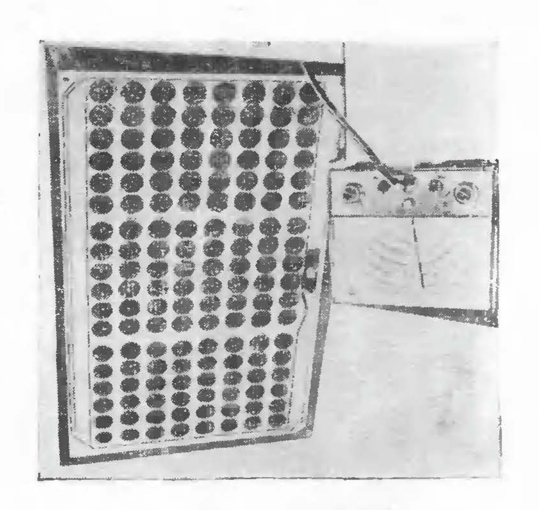


Рис. 18. Батарея, состоящая из 144 элементов.

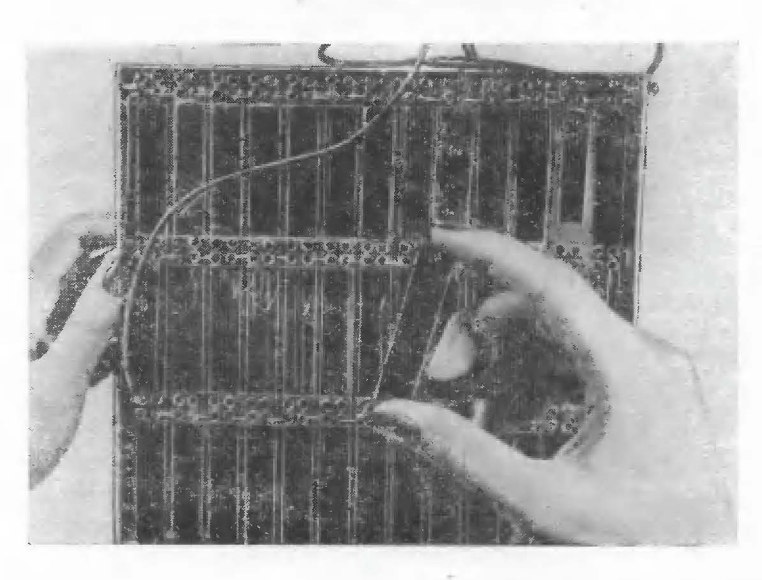


Рис. 19. Батарея из прямоугольных преобразователей размерами 50×10 *мм*.

На рис. 18 представлена солнечная батарея, состоящая из 144 кремниевых элементов (США). Батарея в яркий солнечный день отдает мощность 5 *вт* при рабочем напряжении 6 *в*. Другая батарея подобного же типа состоит из 432 элементов круглой формы диаметром около 2,5 *см*. Она собрана из 48 последовательно соединенных ячеек. В каждой ячейке находится 9 фотопреобразователей, соединенных параллельно. В условиях летнего солнечного освещения такая батарея дает ток около 0,5 *а* при напряжении на нагрузке, равном 22 *в*. Батарея заключена в алюминиевый корпус. Каждая ячейка состоит из прозрачной пластмассовой коробки, залитой для фокусировки солнечных лучей силиконовым маслом. Покрытие прозрачным пластиком и заливка маслом защищают элементы от ударных воздействий.

Батарея несколько иной конструкции, состоящая из элементов прямоугольной формы, показана на рис. 19.

16. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАТАРЕЙ

Мощность, отдаваемая батареей, в значительной степени зависит от метеорологических условий. Графики на рис. 20 характеризуют работу солнечной батареи из пяти элементов общей площадью около 10 *см*² в условиях различного естественного освещения. Из этого рисунка видно, что зарядный ток, а следовательно, и отдаваемая мощность в пасмурную погоду резко снижаются. Поведение той же батареи при длительной работе в естественных условиях иллюстрирует график на рис. 21, отражающий изменение солнечной радиации по временам года.

Падение мощности при ухудшении усло-

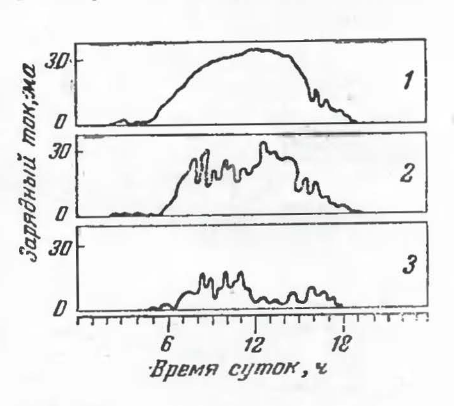


Рис. 20. Работа солнечной батареи из пяти элементов общей площадью 10 *см*² при разных условиях освещенности.

1 — ясно (август); *2* — частичная облачность (сентябрь); *3* — сплошная облачность (сентябрь).

вий освещенности происходит главным образом за счет уменьшения отдаваемого батареей тока, так как э. д. с. значительно менее чувствительна к изменению интенсивности естественной освещенности, нежели ток короткого замыкания.

Для оценки целесообразности использования солнечных батарей в различных районах Советского Союза необходимо знание количества ясных и пасмурных дней в данном районе. Таблицы с вероятностями ясной, полуясной и пасмурной погоды имеются в климатических справочниках. Ориентировочно можно считать, что на Севере и в средней полосе Советского Союза вероятность ясной погоды составляет 15—20%, полуясной—10—20% и пасмурной — 55—75%. На Юге СССР (в Средней Азии) вероятность ясной и полуясной погоды составляет 80%, а пасмурной — 20%. Путем расчетов установлено, что в течение года в южных районах нашей страны можно получить с каждого квадратного метра площади 1 160—1 630 *квт·ч* электроэнергии.

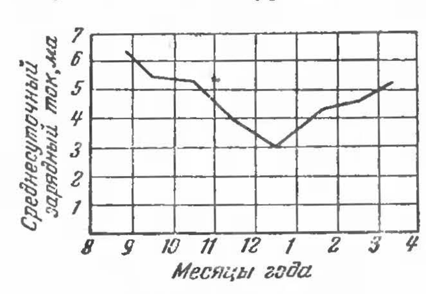


Рис. 21. Изменение величины зарядного тока, отдаваемого солнечной батареей, в зависимости от времени года.

В табл. 2 указана вероятность ясной и пасмурной погоды для различных городов СССР, приведенная к интервалам с 22-го числа предыдущего месяца до 21-го числа данного месяца (середина интервала приходится на 7-е число). Вероятность полуясной погоды может быть получена как дополнение суммы вероятностей ясной и пасмурной погоды до 100%. Пользуясь таблицей, можно ориентировочно подсчитать мощность, которую будет отдавать солнечная батарея в различных районах СССР. Названия городов в таблице даны в порядке убывания географических широт.

Режим прихода солнечной энергии на Землю в течение года и суток весьма непостоянен. Так, например, для южных районов нашей страны, расположенных

Таблица 2

Название пункта	Состояние неба	День/месяц											
		6/1	5/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	7/8	7/9	7/10	7/11	7/12
		Вероятность ясного и пасмурного состояния неба, %											
Маточкин шар	Ясно	23	21	22	21	16	16	22	16	9	7	10	18
	Пасмурно	64	68	68	68	73	75	65	68	80	82	78	70
Салехард	Ясно	23	23	31	28	19	14	18	16	10	11	17	19
	Пасмурно	63	62	53	57	68	70	63	66	76	77	71	68
Свердловск	Ясно	25	32	37	38	29	26	23	24	24	20	15	19
	Пасмурно	66	59	52	48	50	51	50	53	57	68	77	72
Москва	Ясно	13	16	23	28	29	28	29	28	24	21	12	9
	Пасмурно	80	74	67	57	44	43	41	44	52	62	79	84
Новосибирск	Ясно	28	34	39	39	33	25	27	29	29	21	19	24
	Пасмурно	60	54	49	47	48	51	46	47	54	63	70	66
Иркутск	Ясно	30	39	40	30	19	15	11	15	23	25	18	17
	Пасмурно	53	46	45	52	63	66	69	63	57	58	66	68
Атбасар	Ясно	27	34	42	42	36	32	34	36	36	29	25	26
	Пасмурно	59	50	43	40	34	32	30	32	38	51	59	61

Продолжение табл. 2

Название пункта	Состояние неба	День/месяц											
		6/1	5/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	7/8	7/9	7/10	7/11	7/12
		Вероятность ясного и пасмурного состояния неба, %											
Уральск	Ясно	18	28	32	32	29	28	31	36	34	30	20	18
	Пасмурно	66	56	50	44	38	35	32	30	35	46	64	68
Семипалатинск	Ясно	34	43	44	45	42	35	36	40	47	34	29	30
	Пасмурно	53	43	42	39	36	37	38	30	30	48	55	56
Харьков	Ясно	13	20	21	26	34	31	34	46	43	37	17	13
	Пасмурно	81	74	71	62	48	45	43	32	40	52	76	82
Астрахань	Ясно	25	30	38	46	50	53	57	64	65	56	33	20
	Пасмурно	67	62	51	37	28	22	19	15	17	28	53	73
Казалинск	Ясно	29	38	44	49	54	63	68	75	75	61	39	30
	Пасмурно	59	48	40	31	20	13	10	7	8	20	43	57
Краснодар	Ясно	20	20	24	30	35	38	46	57	57	47	31	20
	Пасмурно	68	68	61	52	41	33	26	18	26	37	54	68
Алма-Ата	Ясно	22	23	28	27	29	25	31	43	54	47	38	22
	Пасмурно	32	29	24	28	22	15	11	8	4	13	29	38

Продолжение табл. 2

Название пункта	Состояние неба	День/месяц											
		6/1	5/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	7/8	7/9	7/10	7/11	7/12
		Вероятность ясного и пасмурного состояния неба, %											
Ташкент	Ясно	17	17	19	20	32	48	67	79	74	53	37	23
	Пасмурно	41	39	38	26	16	10	4	1	2	13	20	43
Красноводск	Ясно	14	16	24	24	31	46	53	58	57	49	26	18
	Пасмурно	35	32	27	24	18	7	6	4	6	9	22	29
Бухара	Ясно	17	22	33	27	36	60	82	89	85	63	42	24
	Пасмурно	43	33	32	21	12	5	1	0	0	7	18	35
Ашхабад	Ясно	21	22	21	20	30	51	64	74	76	59	33	24
	Пасмурно	44	37	36	29	19	9	4	3	2	8	25	25
Хорог	Ясно	35	28	27	29	30	43	62	72	76	59	46	41
	Пасмурно	23	23	23	18	17	8	7	2	2	8	15	22
Кушка	Ясно	21	19	28	38	42	70	91	96	92	75	50	36
	Пасмурно	38	35	33	23	15	3	0	0	0	5	17	30

между 35 и 45° северной широты, продолжительность солнечного дня колеблется от 8 (зимой) до 16 *ч* (летом).

В начале и конце ясного солнечного дня количество солнечной энергии, падающее на плоскость, расположенную перпендикулярно направлению на Солнце, невелико (кривая *1* на рис. 22). Через час после восхода Солнца оно уже достигает значительной величины. Далее, скорость возрастания падающей энергии постепенно уменьшается. В полдень энергия достигает своего максимального значения (около 900 *вт/м*²). После полудня количество падающей энергии уменьшается, и в конце дня она быстро снижается до нуля. В полностью пасмурные дни может быть использована только энергия диффузионного рассеяния (кривая *2* на рис. 22).

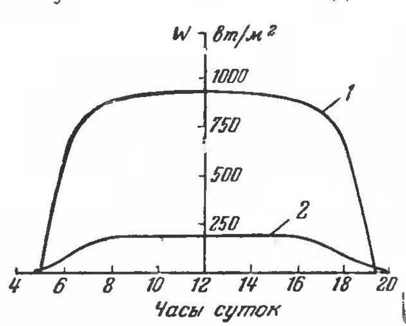


Рис. 22. График суточного изменения количества солнечной энергии *W*, падающей на плоскость, перпендикулярную солнечным лучам.

1 — в ясный день; *2* — в пасмурный день.

Для того чтобы на плоскость солнечной батареи падало максимальное количество энергии, последняя должна быть все время направлена перпендикулярно направлению падения солнечных лучей, чего можно достичь путем соединения батареи со следящим устройством. Однако следящая система сама будет потреблять некоторую энергию. Кроме того, стоимость следящей системы относительно высока. Поэтому следящие устройства, очевидно, будут применяться только совместно с солнечными батареями мощностью не менее 100 *вт*. В случае отсутствия ориентирующего устройства необходимо найти оптимально постоянное положение стационарной плоскости.

Стационарные плоскости, на которых следует располагать солнечные батареи, должны быть обращены на юг, но иметь различный угол наклона к вертикали в зависимости от времени года и широты местности. Оптимальные значения угла наклона стационарной пло-

скости к вертикали для 30—45° северной широты представлены графиками на рис. 23. Руководствуясь приведенными графиками, можно, хотя бы раз в месяц, менять положение рабочей поверхности неориентируемой солнечной батареи, чтобы она находилась в наиболее выгодных условиях освещения солнечными лучами.

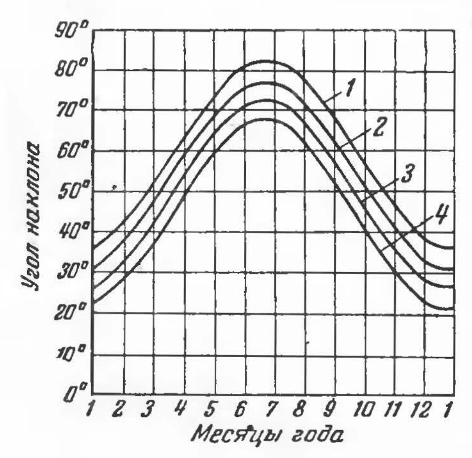


Рис. 23. Оптимальный угол наклона стационарной плоскости (к вертикали) в различное время года.

1 — 30° сев. широты; *2* — 35° сев. широты; *3* — 40° сев. широты; *4* — 45° сев. широты.

Итак, мощность световой энергии, падающей на наклонную поверхность, в значительной степени зависит от ориентации поверхности относительно стран света и вертикали[1].

Для повышения получаемой от солнечных батарей мощности могут быть использованы различные системы, усиливающие интенсивность падающего на них света (отражатели, линзы).

Солнечная батарея с металлическим собирающим зеркалом изображена на рис. 24. Элементы солнечной

[1] Для Ташкентской станции, например, найдено, что энергия, получаемая одной и той же поверхностью, в зависимости от способа ориентации пропорциональна следующим коэффициентам: поверхность, на которую солнечные лучи все время падают перпендикулярно, — 100; поверхность, вращающаяся вокруг мировой оси, — 95; поверхность, зафиксированная в оптимальном положении, — 70; горизонтальная поверхность — 50.

батареи расположены вдоль линии фокуса параболоцилиндрического отражателя. Однако чрезмерная концентрация светового потока без наличия дополнительной системы охлаждения невыгодна, ибо она приводит к значительному перегреву преобразователей, что влечет за собой резкое падение их к. п. д. Напомним, что

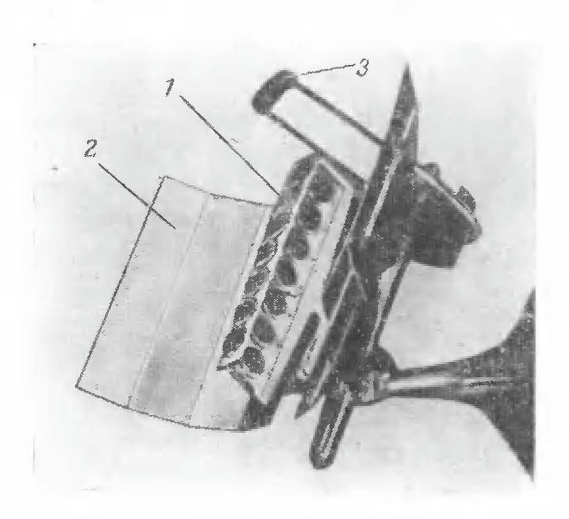


Рис. 24. Солнечная батарея, снабженная металлическим зеркальным отражателем.
1 — фотопреобразователи батареи; *2* — отражатель; *3* — элемент наведения.

солнечные батареи работают эффективно в температурном интервале от —65 до +175° С.

Выше отмечалось, что величина оптимального сопротивления нагрузки при заданном освещении вполне определенна для данного преобразователя или батареи. Если же нагрузка меняется, а применение буферного аккумулятора или конденсатора по каким-либо причинам нежелательно, то в зависимости от предъявляемых требований рабочую точку необходимо выбирать или в области малых токов, или в области малых напряжений, т. е. на участках, где ток или напряжение мало зависит от изменения нагрузки. Естественно, что к. п. д. батареи при этом снижается.

Неравномерный характер прихода солнечной энергии

на земную поверхность приводит к необходимости использовать солнечную батарею совместно с буферными аккумуляторами, чтобы накапливать излишки энергии, получаемые в ясную погоду.

Параметры солнечной батареи для зарядки аккумуляторов определяются в зависимости от типа последних. Число последовательно соединенных фотопреобразователей должно быть таким, чтобы рабочее напряжение, подводимое к аккумуляторам (т. е. с учетом падения напряжения в зарядной цепи), немного превышало их э. д. с., а нагрузочный ток батареи обеспечивал требуемую величину зарядного тока. Обеспечение нужного зарядного тока обычно достигается или выбором преобразователей соответствующей площади, или за счет параллельного соединения необходимого числа преобразователей.

Расчет параметров солнечной батареи, приемлемой для зарядки аккумуляторной батареи, питающей какое-либо устройство, т. е. солнечной батареи, работающей только в качестве зарядной станции, сводится к следующему.

Возьмем в качестве примера транзисторный приемник, потребляющий ток 40 *ма* при напряжении 9 *в*. Для питания этого приемника от щелочных аккумуляторов типа НКН, рабочее напряжение одной банки которых равно 1,3 *в*, потребуется батарея, состоящая из семи банок.

Предположим, что приемник в течение суток будет работать по 5 *ч*. Тогда за неделю батарея аккумуляторов отдает количество электричества, равное $Q = 5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 1{,}4$ *а · ч*.

Этот расход должен быть восполнен солнечной батареей, параметры которой надлежит определить. При расчете примем, что: 1) в ясную погоду продолжительность солнечного освещения равна 10 *ч*; 2) плоскость батареи все время перпендикулярна лучам солнца; 3) среднедневная плотность зарядного тока солнечной батареи J_c в ясную погоду составляет 10 $ма/см^2$; 4) в течение недели имеются три ясных дня, когда и производится зарядка батареи.

Напряжение, подводимое при зарядке к каждой банке аккумуляторов типа НКН, должно составлять около 2 *в*. Поэтому для обепечения зарядки батареи потре-

буется источник с напряжением $2\times7=14$ *в*. Такое напряжение может быть обеспечено солнечной батареей, состоящей из $14:0,4=35$ последовательно соединенных преобразователей (0,4 *в* — оптимальное рабочее напряжение кремниевого преобразователя).

Токовая площадь батарей, т. е. площадь S, обусловливающая величину тока солнечной батареи[1], должна быть равна:

$$S=\frac{Q}{j_c N_ч N_д}=\frac{1,4\cdot1,3}{10\cdot10^{-3}\cdot10\cdot3}=6,1\ см^2,$$

где Q — количество электричества, которое необходимо сообщить аккумулятору при зарядке (обычно оно в 1,2 — 1,4 раза превышает количество электричества, которое аккумулятор должен отдать при разрядке);

$N_ч$ — продолжительность ежесуточной зарядки, *ч*;

$N_д$ — число суток (дней) зарядки.

Теперь легко можно определить все электрические параметры солнечной батареи:

$$U_{х.х}=0,5\cdot35=17,5\ в;$$

$$I_{к.з}=20\cdot6,1=122\ ма=0,122\ а;$$

$$P_{макс}=0,6\cdot17,5\cdot0,122=1,28\ вт.$$

Общая площадь солнечной батареи будет равна:

$$S_{общ}=6,1\cdot35=214\ см^2\approx2\ дм^2.$$

Однако если применить простейшие отражатели в виде металлических плоских зеркал, расположенных под оптимальным углом с четырех сторон корпуса батареи, эффективность батареи можно увеличивать в 2 раза и тот же зарядный ток может быть получен при токовой площади, равной примерно 3 $см^2$. При этом общая рабочая площадь батареи сократится до ~100 $см^2$.

В случае питания приемника непосредственно от солнечной батареи, когда аккумуляторы работают в бу-

[1] Эта площадь может быть обеспечена одним большим фотопреобразователем или несколькими параллельно соединенными преобразователями меньших размеров.

ферном режиме, параметры солнечной батареи для принятых нами условий останутся неизменными. Это объясняется тем, что при работе в буферном режиме часть энергии солнечных батарей расходуется на подзарядку аккумуляторов, а часть — непосредственно на питание приемника. Но общий баланс электрической энергии в цепи «источник — потребитель» (солнечная батарея — приемник) остается неизменным.

При использовании солнечных батарей для зарядки аккумуляторов следует иметь в виду, что при низкой освещенности, когда э. д. с. солнечной батареи падает, возникает опасность разряда аккумуляторов через сопротивление батареи. Это нежелательное явление может быть предотвращено путем включения в зарядную цепь диода. Последний должен быть включен в направлении пропускания для зарядного тока и в направлении запирания — для разрядного. Диод следует подбирать низкоомным, чтобы свести к минимуму падение напряжения на нем. По этой причине могут быть использованы лишь плоскостные германиевые или кремниевые диоды. Селеновые выпрямители или точечные диоды для этого непригодны.

17. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В большинстве случаев применение солнечных батарей носит пока еще экспериментальный характер, однако уже сейчас четко вырисовываются самые разнообразные области их использования. Основные из них будут рассмотрены в настоящем параграфе.

Весьма перспективно использование солнечных батарей для питания транзисторных приемников, отличающихся большой экономичностью. Так, например, батарея с рабочим напряжением 5 *в* при токе 20 *ма* обеспечивает энергией радиоприемники «Фестиваль» и «Солнечный», а батарея напряжением 7 *в*, развивающая ток 40 *ма*, может питать радиоприемник «Кристалл» (рис. 25). Эта же батарея может питать пересчетную схему для счетчика Гейгера и преобразователь для подачи на счетчик высокого напряжения.

Солнечная батарея для питания радиоприемника «Адмирал» (США) состоит из 32 прямоугольных фотопреобразователей типа 120С размерами 20×10 *мм*, соединенных последовательно. Батарея дает ток 15 *ма*

при рабочем напряжении 9 *в*. Фотопреобразователи батареи помещены в герметичную коробку из прозрачной пластмассы, которая заполнена силиконовым мас-

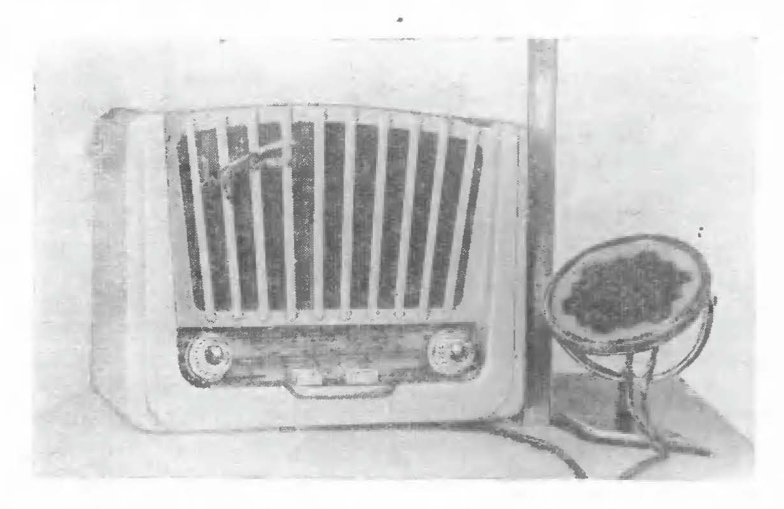


Рис. 25. Радиоприемник „Кристалл", питаемый от солнечной батареи.

лом. Размеры батареи составляют 150×100×12,5 *мм*. Батарея смонтирована в общем кожаном футляре. В рабочем положении она может быть вынута и ориентирована на солнце. Такая батарея дает также достаточную энергию для питания приемника и при освещении ее искусственным светом. Вынутая из футляра, она соединяется с приемником специальным шнуром. Приемник содержит шесть транзисторов и два германиевых диода. Максимальная выходная мощность его равна 250 *мвт*.

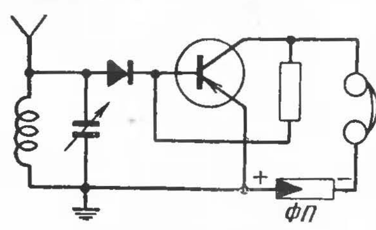


Рис. 26. Схема приемника с одним фотопреобразователем.

На рис. 26 приведена схема простейшего радиоприемника, питаемая только одним фотопреобразователем *ФП*. Этот приемник может работать на головной телефон даже при слегка рассеянном искусственном

освещении. При ярком же свете и подключении внешней антенны приемник может работать и на небольшой громкоговоритель.

Более мощная батарея, например из 432 преобразователей, устанавливалась в оптимальном положении на опоры воздушной линии связи и использовалась для зарядки никель-кадмиевых аккумуляторов, которые в свою очередь питали переносное телефонное устрой-

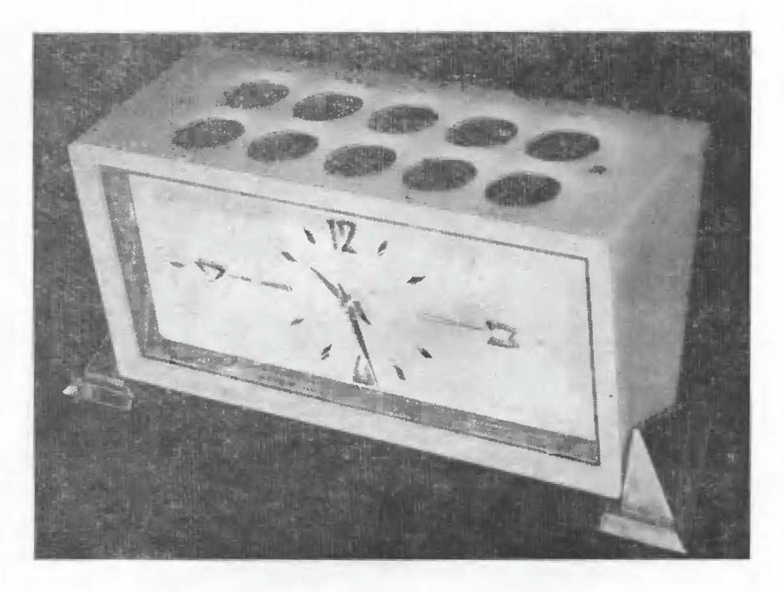


Рис. 27. Солнечные часы.

ство, собранное на транзисторах. Батарея в ясные солнечные дни обеспечивала аккумуляторы энергией, достаточной для работы устройства в ночное время и пасмурную погоду.

Весьма интересным применением солнечных батарей является использование их в слуховых аппаратах. В аппарате фирмы Ценис (США) четыре кремниевых фотопреобразователя устанавливались наверху миниатюрного транзисторного слухового аппарата, вмонтированного в одну из дужек оправы очков. Для работы слухового аппарата была достаточной мощность, которую давала солнечная батарея даже в облачный

день. Эта же батарея заряжала маленький никель-кадмиевый аккумулятор (вмонтированный в другую дужку), который обеспечивал питанием слуховой аппарат в случае, если выходная мощность батареи была недостаточной.

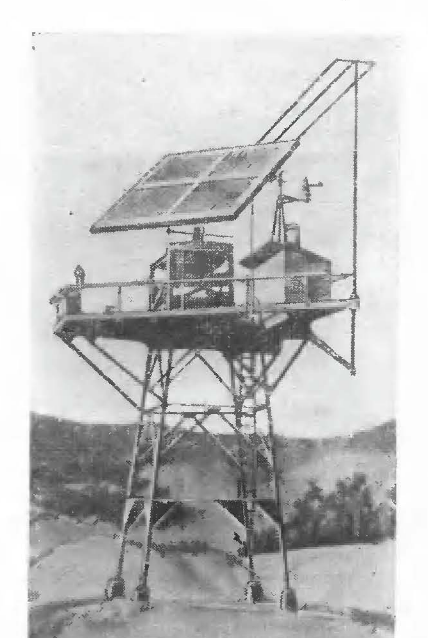


Рис. 28. Автоматическая метеостанция, питающаяся от солнечной батареи, снабженной системой самонаведения.

В американской печати сообщалось, что солнечная батарея для питания передатчика была смонтирована на солдатской каске.

На рис. 27 изображены солнечные часы конструкции НИИчаспрома. Солнечная батарея из 10 фотопреобразователей диаметром 30 *мм* в соединении с аккумуляторами обеспечивает при рассеянном свете в комнате круглосуточную работу часов.

Весьма перспективным является использование солнечных батарей для питания автоматических метеорологических станций. На рис. 28 изображена подобная станция. Комплект солнечных преобразователей снабжен следящим за солнцем устройством и может обеспечить электроэнергией все метеоприборы и аппаратуру для записи показаний и передачи их на центральную станцию бюро прогнозов.

В настоящее время в ряде стран разработан прототип автомобиля с питанием от солнечной батареи, помещаемой на крыше машины.

На Выставке достижений народного хозяйства в 1959 г. были представлены солнечные батареи различных мощностей. Например, портативная переносная гелиоэлектростанция мощностью около 100 *вт* была

представлена в двух вариантах оформления (рис. 29). В «жестком» варианте батарея изготовлена из небольших дюралюминиевых листов с накленными на них фотоэлементами. В походе секции складываются «гармошкой» и пакуются в чемодан-кожух. Для приведения батареи в действие листы «гармошки» разворачиваются в одну плоскость и крепятся на дюралюми-

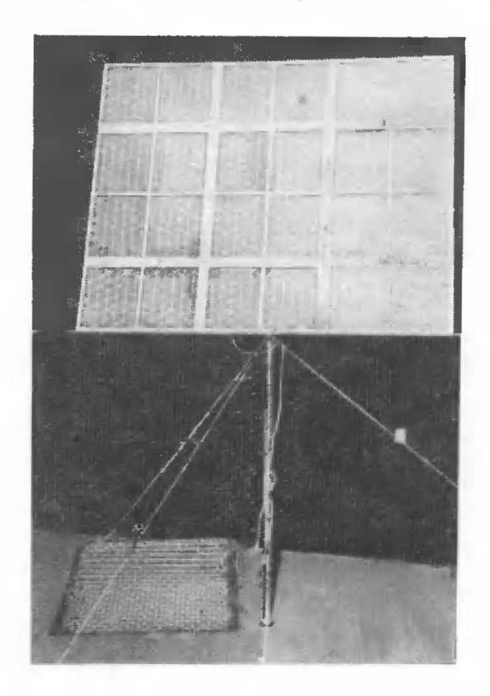


Рис. 29. Портативная переносная гелиоэлектростанция из кремниевых фотопреобразователей для геологоразведочных партий.

ниевой трубке. Крепящее устройство предусматривает возможность установки солнечной батареи под любым углом к горизонту.

«Мягкий» вариант батареи оформлен в виде брезентового полотна, на котором укреплены отдельные фотоэлементы, заключенные в металлическую оправу и залитые специальным прозрачным составом. Металлическая армировка и заливка предохраняют фотоэлементы от

поломок и повреждений при сворачивании солнечной батареи в рулон. Для приведения солнечной батареи в действие рулон раскатывают и натягивают на раме, состоящей из бамбуковых палок или дюралюминиевых труб. Для установки батареи под нужным углом предусмотрены раздвигающиеся подпорки.

Там же (на выставке) был представлен макет светового бакена, солнечная батарея которого обеспечивала заряд аккумуляторов для работы в ночное время.

На выставке имелся также макет солнечной гелиоэлектростанции будущего. Подобные электростанции смогут быть построены лишь тогда, когда кремний, необходимый для изготовления солнечных батарей, будет достаточно дешев. Однако о целесообразных размерах и мощностях таких электростанций пока говорить еще трудно.

При создании солнечной электростанции мощностью 1 000 *квт*, работающей с к. п. д. 8% и имеющей буферную батарею аккумуляторов, потребуется площадь преобразователей около 5—6 *га*. Создание подобных станций пока еще является трудно выполнимой задачей. Центральные солнечные станции, по-видимому, нецелесообразно создавать и благодаря наличию рассеяния (потерь) энергии в передающей сети. Гораздо экономичнее, по крайней мере в ближайшем будущем, преобразовывать солнечную энергию на месте потребления. Поэтому, по мнению ряда авторов, возможно окажется более целесообразным использование солнечной энергии для удовлетворения потребностей в электроэнергии небольших жилых домов. В этом случае с площади 100 $м^2$ можно получить при к. п. д. 5% 29 *квт·ч* электроэнергии за сутки, что значительно превышает потребность в электроэнергии односемейного дома с учетом применения всех новейших бытовых электроприборов.

Такие малые станции на Юге СССР, особенно в удаленных горных и пустынных районах, будут экономичными, простыми в эксплуатации и практически вечными.

Весьма эффективным оказалось применение фотопреобразователей для питания радиоаппаратуры искусственных спутников Земли. Солнечные батареи, установленные на третьем советском спутнике Земли, бесперебойно работали в течение всего времени существо-

вания спутника, обеспечивая электроэнергией передатчик «Маяк».

Учитывая благоприятные условия для работы солнечных батарей за пределами атмосферы (отсутствие облаков, более высокая, чем на поверхности Земли, мощность солнечного излучения на единицу площади), можно предположить, что на ближайшие годы солнечные батареи явятся основным источником энергопитания искусственных спутников.

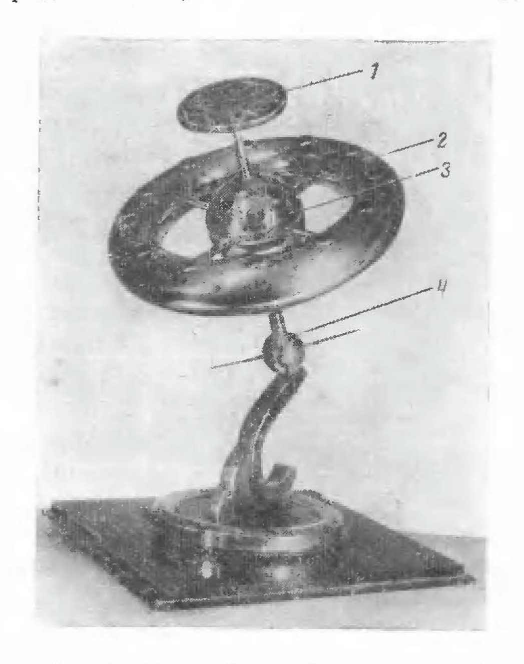


Рис. 30. Макет будущей межпланетной станции.

1—солнечная батарея, служащая для электроснабжения станции; 2—служебные и жилые помещения; 3—электродвигатели центрального шара, которые, вращая колесо, создадут искусственное тяготение; 4—радиостанция с антеннами.

На Всесоюзной промышленной выставке в 1958 г. и Всемирной выставке в Брюсселе в 1959 г. демонстрировалась модель будущей межпланетной станции (рис. 30). Модель приводилась в действие солнечной батареей. В этой модели солнечная энергия использова-

лась для получения механической энергии вращения двигателя.

За последнее время в печати появилось много работ, посвященных исследованию действия космического излучения и солнечной радиации на работу кремниевых фотоэлементов, находящихся в верхних слоях атмосферы. Авторы этих работ заключают, что кремниевые элементы, несмотря на облучение, не потеряют заметно своей работоспособности в течение около 100 000 лет.

Поскольку фотопреобразователи являются фотоэлементами, они могут также быть использованы в различных автоматических устройствах, счетных и сортирующих машинах, где необходима чувствительность к изменению интенсивности света. Так, кремниевые фотоэлементы могут «проследить» прерывание света, происходящее с частотой 50 *кгц*.

Можно также с уверенностью сказать, что кремниевые фотопреобразователи найдут широкое применение в фото- и киноаппаратуре. Здесь они могут быть приспособлены в качестве экспонометров с неограниченным сроком службы или являться составной частью устройства, автоматически изменяющего диафрагму аппарата в зависимости от степени освещенности.

Возможности использования солнечных батарей в народном хозяйстве далеко не исчерпаны перечисленными примерами. С каждым годом область их применения расширяется. Нет сомнения, что в ближайшие годы солнечные батареи займут прочное место в народном хозяйстве нашей страны.

ПРИЛОЖЕНИЕ

К выражению $I^{-}_{n0} = I^{-}_{темн} e^{\frac{qU_{x.x}}{kT}}$ (см. стр. 23) легко прийти из следующих рассуждений.

Диффузионный электронный ток можно выразить как

$$I^{-}_{n\,0} = qD_n \frac{dn}{dx},$$

где q — заряд электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*);

D_n — коэффициент диффузии электронов;

$\frac{dn}{dx}$ — градиент концентрации электронов вдоль сечения, перпендикулярного p-n-переходу.

Этот диффузионный ток должен после достижения равновесия уравниваться потоком, электронов в обратном направлении, который создается электрическим полем (на *p-n*-переходе) $E=\frac{dU}{dx}$:

$$qD_n\frac{dn}{dx}=qnE\mu_n,$$

где n — концентрация электронов;

μ — подвижность электронов, *см/сек*².

Подставив в это выражение известное соотношение Эйнштейна $\left(\frac{D}{\mu}=\frac{kT}{q}\right)$, получим:

$$\frac{dn}{n}=\frac{q}{kT}\cdot\frac{dU}{dx}dx.$$

Интегрируя последнее выражение по всей толщине переходного слоя на *p-n*-переходе, имеем:

$$\int\limits_{I_{n\,o}^-}^{I_{p\,o}^-}\frac{dn}{n}=\frac{q}{kT}\int\limits_{U_{x.x}}^{0}dU.$$

Пределы интегрирования обусловлены тем, что рассматриваем поток электронов через *p-n*-переход по направлению из *n*-области в *p*-область.

Вычисление интегралов дает:

$$\ln\frac{I_{n\,o}^-}{I_{p\,o}^-}=\frac{qU_{x.x}}{kT},$$

или с учетом уравнения (5) получим:

$$I_{n\,o}^-=I_{p\,o}^-e^{\frac{qU_{x.x}}{kT}}=I_{темн}^-e^{\frac{qU_{x.x}}{kT}}.$$

Аналогично получается выражение и для $I_{p\,o}^+$.

СОДЕРЖАНИЕ

10-

Цена 15 коп.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 834

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫПУСКИ:

Г. П. Самойлов, Ремонт развертывающих устройств телевизоров, 104 стр., тираж 100 000 экз., ц. 23 коп., вып. 377.

П. А. Попов, Расчет транзисторных усилителей звуковой частоты, 104 стр., тираж 60 000 (1-й завод 10 000), ц. 23 коп., вып. 378.

Т. И. Изюмова и В. Т. Свиридов, Полые и ленточные радиоволноводы, 96 стр., тираж 32 000 экз., ц. 22 коп., вып. 379.

И. П. Жеребцов, Основы электроники (учебная серия), 608 стр., тираж 100 000 (1-й завод 20 000 экз.), ц. 1 р. 54 к., вып. 380.

Е. М. Мартынов, Электронные устройства дискретного действия, 128 стр., тираж 40 000 экз., ц. 30 коп., вып. 381.

Г. П. Грудинская, Распространение ультракоротких волн (издание второе, переработанное), 104 стр., тираж 50 000 экз., (1-й завод 15 000 экз.), ц. 23 коп., вып. 382.

И. Я. Брейдо, Ламповые усилители сигналов постоянного тока, 88 стр., тираж 50 000 (1-й завод 10 000 экз.), ц. 20 коп., вып. 384.

Г. Б. Богатов, Как было получено изображение обратной стороны Луны, 64 стр., тираж 50 000 (1-й завод 10 000 экз.), ц. 14 коп., вып. 385.

С. Е. Загик и Л. М. Капчинский, Приемные телевизионные антенны, 178 стр., тираж 140 000 экз. (1-й завод 10 000 экз.), ц. 27 коп., вып. 386.

ПЕЧАТАЮТСЯ:

383 - **А. М. Бройде и Ф. И. Тарасов**, Справочник по электровакуумным и полупроводниковым приборам.

387 - **С. А. Ельяшкевич**, Устранение неисправностей в телевизоре.

388 - **А. И. Зиньковский**, Радиотехника и космические полеты.

Г. П. Самойлов, Уход за телевизором.

А. А. Корнеев и А. Н. Корнеев, Адаптеризованная гитара.